



**UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍAS.  
RECINTO UNIVERSITARIO SIMÓN BOLÍVAR.  
FACULTA DE ELECTROTECNIA Y COMPUTACIÓN.  
INGENIERÍA ELÉCTRICA.**

**MONOGRAFIA PARA OPTAR AL TITULO DE INGENIERA  
ELECTRICA.**

**IMPLEMENTACIÓN DE TÉCNICAS DE ANALISIS RCM EN EL  
TURBOGENERADOR DE CONDENSACIÓN DE LA PLANTA  
ELÉCTRICA MONTE ROSA.**

**AUTORES:**

- **José Alejandro Reyes Reyes**                      **2013 – 62054.**
- **Marcos Manuel Campos Bravo**                      **2013 – 61866.**

**TUTOR:**

- **Prof. Julio Canales.**

**ASESORES:**

- **Ing. Alejandro Martinez.**
- **Ing. Leonardo Giuseppe.**

### ***Agradecimientos:***

- En primer lugar, damos las gracias a nuestro Señor Jesucristo por darnos la sabiduría y el entendimiento para poder finalizar este trabajo.
- Le damos las gracias a nuestros padres por darnos todo su apoyo, por la lucha que hicieron para que nosotros podamos terminar nuestra carrera.
- Agradecemos al ing. Jiménez, Ing. Martínez e ing. Oconor y el Prof. Julio Canales por asesorarnos y ayudarnos a aclarar las dudas con el fin de realizar un trabajo de calidad.

### ***Dedicatoria:***

- Dedico este trabajo a mi madre Mercedes Reyes, por todo su esfuerzo y sacrificio para darme la oportunidad de culminar una carrera profesional, por inspirarme y darme palabras de aliento para esforzarme más cada día.
- A mi abuelo Alejandro Martínez, que en paz descansa, a él porque siempre me ayudo con lo poco que tenía para poder verme con un título universitario.
- A mi pareja y hermanos, por sus palabras de aliento y motivaciones de cada día.

*José Alejandro Reyes Reyes.*

### ***Dedicatoria:***

Dedico este trabajo a mí familia que estuvo presente en cada proceso de mi crecimiento personal y formación, siempre fueron el pilar principal y apoyo en los momentos más difíciles.

Mis maestros que con más sincero esmero se esforzaron en compartir sus conocimientos.

*Marcos Manuel Campos Bravo.*

## **Resumen.**

El mantenimiento centrado en la confiabilidad es un proceso para asegurar que los sistemas sigan haciendo lo que sus usuarios requieran de él, en el contexto operativo. Se utiliza generalmente para lograr mejoras en campos tales como el establecimiento de niveles mínimos de seguridad de mantenimiento. La implementación exitosa de estas herramientas en la planta Monte Rosa dará lugar al aumento de la rentabilidad, la fiabilidad, la disponibilidad de la máquina y una mayor comprensión del nivel de riesgo que la organización está y el aumento del beneficio relacionado.

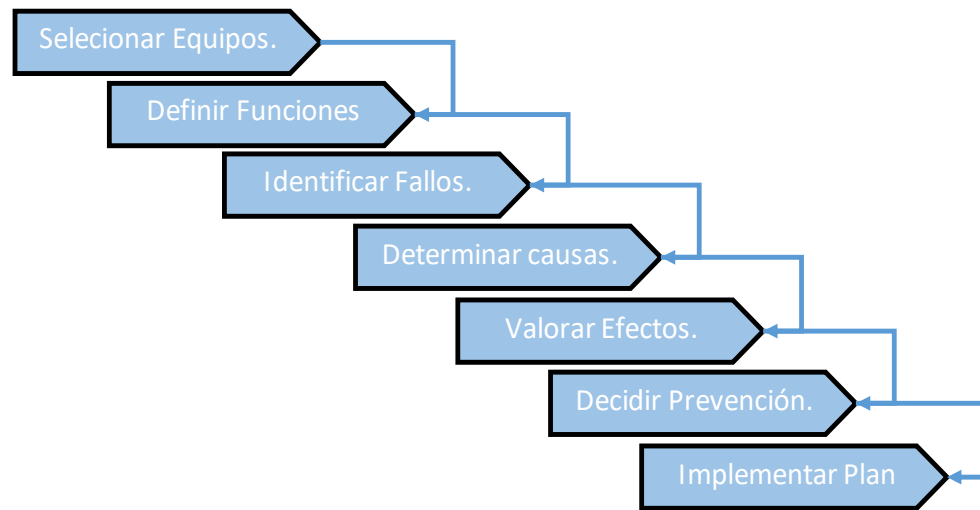
¿Para qué servirá la implementación del mantenimiento basado en la confiabilidad en la Planta Monte Rosa?

Para llevar un control de los posibles fallos en el sistema de trabajo, así como de sus causas, que es de vital importancia en las operaciones industriales. Con ello, lo que se busca es que siempre existe una oportunidad de mejora en los procesos de mantenimiento, pues se pueden estar trabajando con conceptos erróneos. Para comenzar el análisis de mantenimiento basado en confiabilidad hay que desglosar las actividades o funciones, pero también hay que buscar la posibilidad que existan funciones asociadas a la función principal. Una vez definido la función, hay que hacer una clasificación de las posibles fallas de la función, y diferenciar entre efectos y consecuencias de la falla, es decir, el efecto es la descripción cuando sucede la falla mientras la consecuencia es el impacto que provoca.

En el proceso nos podemos encontrar con fallas ocultas, que son aquellas que son provocadas por sistemas de prevención de fallas, puede ser el caso de un fusible, siempre hay que realizar una trazabilidad hacia atrás para cubrir todas las posibilidades.

Entonces una vez con el problema descrito tenemos que tratar cual es la mejor solución, por ello podemos optar por una serie de distintas estrategias de mantenimientos.

Para realizar este estudio, seguiremos los pasos establecidos por norma técnica SAE JA1011 criterios de la evaluación de procesos del mantenimiento basado en confiabilidad.



¿Qué ventajas tendrá la implementación?

La implementación del mantenimiento basado en la confiabilidad y la aplicación de medidas preventivas que emanan de este riguroso estudio, tienen una serie de ventajas sobre otras formas de abordar el mantenimiento de la instalación y de evitar averías y sus daños colaterales. Las siguientes ventajas tienen mucho que ver con el rigor con el que se realiza el estudio y con el hecho de que se trata de un plan de mantenimiento que considera no solo los equipos, sino la instalación como un todo que va más allá de una simple suma de equipos. Entre todas las ventajas, mencionas las tres más importantes:

- **Mejora de la seguridad:**

La primera de estas ventajas es la mejora que se produce en la seguridad de la planta, es decir, en la prevención de los riesgos derivados del trabajo. Al identificar, categorizar y tratar de evitar todos los fallos potenciales de la instalación con posibilidades de causar daños a las personas implícitamente se está trabajando de forma efectiva en la prevención de riesgos, de una manera realmente eficaz y detallada. El mantenimiento basado en confiabilidad no puede sustituir a la evaluación de riesgos de una instalación, pero puede complementar indudablemente ésta.

- **Aumento de la producción:**

La segunda de las ventajas es la mejora en los datos de producción. Las plantas industriales cuyos fallos han sido estudiados y en las que se han implementado las medidas necesarias para evitarlos, acordes con la importancia de éstos, tienen producciones mayores que aquellas en las que la base del mantenimiento es mucho menos rigurosa. Cuando se habla de producción debe entenderse que la

mejora no solo es relativa a la calidad, sino también a la calidad del producto, entendiendo esta calidad como la identificación y la adopción de medidas para evitar que un producto no alcance sus especificaciones.

- **Disminución en los costes de mantenimiento:**

Los fabricantes de los equipos y componentes de las instalaciones proponen unas tareas de mantenimiento exageradas o que deben ser realizadas con frecuencias muy elevadas. El hecho de revisar, desmontar o cambiar piezas más a menudo de lo necesario no solo no contribuye a mejorar los resultados de fiabilidad y a disminuir los fallos en los equipos, sino que, por el contrario, inducen fallos en éstos que antes no tenían. Los mecánicos más experimentados trabajan en muchas ocasiones con un lema, “si funciona no lo toques”. Este lema, a veces muy discutido, se ve avalada por datos estadísticos que demuestran que el hecho de revisar un equipo y actuar sobre él reinicia el periodo de fallos infantiles.

## Contenido

<b>Introducción:</b> .....	1
<b>Objetivos:</b> .....	2
<b>Justificación:</b> .....	3
<b>Capitulo #1: Mantenimiento y RCM</b> .....	4
<b>1.1 RCM, las siete preguntas básicas.</b> .....	5
<b>1.2 ¿Qué logra el RCM?</b> .....	5
<b>Capitulo #2: Funciones.</b> .....	7
<b>2.1 Describiendo funciones.</b> .....	7
<b>2.2 Estándares de funcionamiento.</b> .....	7
<b>2.3 Contexto operacional.</b> .....	9
<b>2.3 Diferentes tipos de funciones.</b> .....	10
<b>2.4 Como deben listarse las funciones.</b> .....	17
<b>Capitulo #3: Fallas Funcionales.</b> .....	19
<b>3.1 Falla</b> .....	19
<b>3.2 Fallas Funcionales.</b> .....	19
<b>3.3 Como deben ser registradas las Fallas Funcionales.</b> .....	23
<b>Capítulo #4: Análisis de Modos de Fallas y sus Efectos (AMFE o FMECA)</b> .....	25
<b>4.1 ¿Qué es un modo de falla?</b> .....	25
<b>4.2 ¿Por qué analizar los modos de fallas?</b> .....	27
<b>4.3 Efectos de las fallas.</b> .....	29
<b>4.4 Fuentes de información acerca de modos de fallos y efectos.</b> .....	32
<b>4.5 Nivel de análisis.</b> .....	33
<b>4.6 ¿Cómo deben documentarse los modos de fallas y sus efectos?</b> .....	37
<b>Capitulo #5: Consecuencias de las Fallas.</b> .....	41
<b>5.1 Merece la pena la aplicación del RCM.</b> .....	41
<b>5.2 Funciones ocultas y evidentes.</b> .....	43
<b>5.3 Consecuencias ambientales y para la seguridad.</b> .....	45
<b>5.4 Consecuencias operacionales.</b> .....	46
<b>5.5 Consecuencias no operacionales.</b> .....	47
<b>5.5 Consecuencias de fallas ocultas.</b> .....	47
<b>5.6 Matriz de criticad.</b> .....	48
<b>Capitulo #6: Diagrama de Decisión de RCM</b> .....	51



<b>6.1 Proceso de decisión del RCM.</b> .....	51
<b>6.2 Llenado de la hoja de decisión.</b> .....	56
<b>Capitulo #7: Aplicación de Metodología RCM.</b> .....	58
<b>7.1 Contexto operacional de la Planta Eléctrica Monte Rosa y mapeo del proceso.</b> .....	58
<b>7.2 Análisis de Criticidad de Alto Nivel.</b> .....	61
<b>7.2 Análisis Funcional</b> .....	66
<b>7.3 Análisis de modos de fallos, efectos y criticidad. (FMECA).</b> .....	75
<b>7.4 Causas de fallos, de los modos de fallos.</b> .....	93
<b>7.5 Determinación de las tareas de mantenimiento óptimas acorde al árbol lógico de decisión aplicado al proceso.</b> .....	103
<b>Conclusiones</b> .....	112
<b>Recomendaciones.</b> .....	113
<b>Bibliografía.</b> .....	114
<b>Anexos:</b> .....	115

## Introducción:

La fiabilidad es el conjunto de actividades con bases científicas y matemáticas, que incorporan metodologías, herramientas y tecnología, con el objetivo de buscar la optimización de los procesos de gestión de los fallos, la mantenibilidad y la eficiencia operativa, en orden a procurar el cumplimiento de las funciones para las que fueron diseñado e implementados los sistemas técnicos de los que componen los procesos productivos.

Normalmente un plan de mantenimiento inicial, está basado en recomendaciones de los fabricantes, más aportaciones puntuales de tareas propuestas por los responsables de mantenimiento en base a su experiencia.

Por otro lado, el mantenimiento basado en confiabilidad, va más allá, tras el estudio de los análisis de fallos, no solo se obtiene un plan de qué trata de evitar esos fallos potenciales, sino que además aporta información valiosa para elaborar o modificar el manual de operación y mantenimiento

El siguiente trabaja trata de realizar un estudio de mantenimiento basado en la confiabilidad. A través de cual se pretende determinar las funciones principales, que son aquellas para la cual fue diseñado el sistema, posterior a ello de estudiaran todos aquellos fallos que tenga como consecuencia el incumplimiento de función principal, a cada fallo se le va a medir la severidad, la ocurrencia y si es detectable, con esas tres mediciones se podrá establecer la criticidad del fallo y se plantearan estrategias de mantenimiento para mitigar el fallo o reducir el costo del mantenimiento.

## Objetivos:

### General

- Realizar estudio de mantenimiento basado en la confiabilidad (RCM) en el turbogenerador de condensación #1 de la Planta Eléctrica Monte Rosa.

### Específicos

- Definir el contexto operacional del sistema completo, el esquema funcional del sistema.
- Analizar base de datos de fallos para lograr identificar el subsistema con mejor oportunidad para la aplicación de la Metodología RCM.
- Plantear un diagrama de flujo del sistema a estudiar e identificar mediante un análisis funcional todas las funciones principales y secundarias del sistema de la turbina de Condensación y asociar los fallos funcionales de las mismas.
- Realizar levantamiento de todos los equipos contenidos en el sistema y su función.
- Detectar todos aquellos modos de fallos funcionales, y efectos de fallo, analizando al mismo tiempo la criticidad de esos modos de fallos utilizando la herramienta de análisis FMECA, aplicada a cada subsistema de la turbina de condensación.
- Determinar a partir de un análisis causa-raíz, todas aquellas causas o mecanismos de fallos de los modos de fallos de cada subsistema.
- Enunciar una estrategia de mantenimiento basado en una lógica estándar para la selección de dicha estrategia a cada mecanismo de fallo.

## Justificación:

El objetivo fundamental de la implementación de un mantenimiento centrado en la fiabilidad en una planta industrial, es aumentar la fiabilidad de la instalación, disminuir los tiempos de parada de planta por averías imprevistas que impidan cumplir con los planes de producción. Otros objetivos son aumentar la disponibilidad, es decir, la proporción de tiempo que la planta está disponible para producir y al mismo tiempo, disminuir los costes de mantenimiento.

Sé sabe que, al momento de realizar la compra de un equipo, el fabricante proporciona un plan de tareas de mantenimiento preventivo para extender la vida útil del equipo, a dichas tareas se le conoce como, mantenimiento inicial, pero existe una gran diferencia entre un mantenimiento inicial y mantenimiento basado en la confiabilidad o análisis de fallo.

En algunos casos, con el análisis basado en la confiabilidad, habrá nuevas tareas de mantenimiento, puntos donde el fabricante no considere necesaria ninguna tarea, en otros casos, se eliminarán algunas tareas por considerarse que los fallos que trataban de evitar, son perfectamente asumibles, es decir que es más económico esperar el fallo y solucionarlo que, realizar determinadas tareas y evitarlo.

Con la aplicación de las herramientas de mantenimiento basado en confiabilidad, se obtendrá un manual de mantenimiento tal que, reduzca los tiempos de fallos, extienda la confiabilidad y disponibilidad de los equipos, mantener repuestos en stock. En otras palabras, para cada fallo habrá establecido un plan de acción que reduzca el costo de explotación y mantenimiento.

## Capítulo #1: Mantenimiento y RCM

Los diccionarios más importantes definen la palabra “mantener” como “causar que continúe” (Oxford), o conservar cada cosa en ser (RAE), esto sugiere que el mantenimiento significa preservar algo. Por otro lado, se está de acuerdo que modificar significa cambiarlo de alguna manera. Cuando nos disponemos a mantener algo, ¿Qué es eso que deseamos causar que continúe?, ¿Cuál es el estado existente que deseamos preservar?, la respuesta a estas preguntas está dada por el hecho que, todo activo físico es puesto en funcionamiento porque alguien quiere que haga algo, es decir se espera que cumpla una función o ciertas funciones específicas.

*Mantener: asegurar que los activos físicos continúen haciendo lo que sus usuarios quieren que haga. [2]*

Los requerimientos de los usuarios van a depender de donde y como se utilice el activo (contexto operacional). Esto lleva a la siguiente definición de mantenimiento centrado en confiabilidad:

*Mantenimiento centrado en confiabilidad es un proceso utilizado para determinar que se debe hacer para asegurar que cualquier activo físico continúe haciendo lo que sus usuarios quieren que haga. [2]*

RCM o Reliability Centred Maintenance, (Mantenimiento Centrado en Fiabilidad) es una técnica más dentro de las posibles para elaborar un plan de mantenimiento en una instalación industrial y presenta algunas ventajas importantes sobre otras técnicas. Inicialmente fue desarrollada para el sector de aviación, donde no se obtenían los resultados más adecuados para la seguridad de la navegación aérea. Posteriormente fue trasladada al campo militar y mucho después al industrial, tras comprobarse los excelentes resultados que había dado en el campo aeronáutico.

## 1.1 RCM, las siete preguntas básicas.

El proceso de RCM formula siete preguntas acerca del activo o sistema que se intenta analizar:

- ¿Cuáles son las funciones y los parámetros de funcionamiento asociados al activo actual en su contexto operacional?
- ¿De qué manera falla en satisfacer dichas funciones?
- ¿Cuál es la causa de cada falla funcional?
- ¿Qué sucede cuando ocurre cada falla?
- ¿En qué sentido es importante cada falla?
- ¿Qué puede hacerse para prevenir o predecir cada falla?
- ¿Qué debe hacerse si no se encuentra una tarea proactiva adecuada?

Para poder lograr las respuestas a estas preguntas en los capítulos siguientes se hablará sobre los conceptos más importantes contenidos en análisis de RCM como son:

- Funciones y parámetros de funcionamiento.
- Fallas funcionales
- Modos de fallas.
- Efectos y consecuencias de las fallas.

## 1.2 ¿Qué logra el RCM?

Con la aplicación del RCM se obtienen los siguientes beneficios:

- **Mayor seguridad e integridad ambiental:** RCM considera las implicancias ambientales y para la seguridad de cada patrón de fallas antes de considerar su efecto en las operaciones. Esto significa que se actúa para minimizar o eliminar todos los riesgos identificables relacionados con la seguridad de los equipos del ambiente. Al incorporar la seguridad a la toma de decisiones de mantenimiento, el RCM también mejora la actitud de las personas en relación a este tema.
- **Mejor funcionamiento operacional:** RCM reconoce que todos los tipos de mantenimiento tienen algún valor y provee reglas para decidir cuál es el

más adecuado en cada situación. De esta manera se asegura que solo se elegirán las formas de mantenimiento más efectivas para cada activo físico y que se tomarán las medidas necesarias en los casos que el mantenimiento no pueda ayudar. Este esfuerzo de ajustar y focalizar el mantenimiento lleva grandes mejoras en el desempeño de los activos existentes donde se les requiere.

- **Mejor costo eficacia del mantenimiento:** RCM continuamente focaliza su atención en las actividades de mantenimiento que tienen mayor efecto en el desempeño de la planta. Esto ayuda a asegurar que todo lo que se gasta para mantenimiento se invierte en las áreas que pueda tener los mejores resultados. Además, si RCM es aplicado correctamente a los sistemas de mantenimiento ya existentes, reduce la cantidad de trabajo de rutina (En otras palabras, las tareas de mantenimiento hechas cíclicamente). Por otro lado, si RCM se utiliza para desarrollar un programa de mantenimiento nuevo; la carga de trabajo resultante es mucho más baja que si el programa es desarrollado con los métodos tradicionales.
- **Mayor vida útil de componentes costosos:** debido al cuidadoso énfasis en el uso de técnicas de mantenimiento en condición.
- **Mayor motivación personal:** Especialmente en las personas involucradas en el proceso de revisión. Esto lleva a un mayor entendimiento general del activo en su contexto operacional, junto con un sentido de pertenencia más amplio de los problemas de mantenimiento y sus soluciones. También aumenta la probabilidad de que las soluciones perduren.

## **Capítulo #2: Funciones.**

Para definir los objetivos del mantenimiento según los requerimientos de los usuarios, se debe obtener un claro entendimiento de las funciones de cada activo físico junto con los parámetros de funcionamiento asociados. Es por esta razón que el proceso de RCM comienza preguntando:

¿Cuáles son las funciones y los parámetros de funcionamiento del activo físico en su contexto operacional actual?

### **2.1 Describiendo funciones.**

Un principio bien establecido por la ingeniería es que las definiciones de funciones deben consistir de un verbo y de un objeto. También ayuda mucho iniciar las definiciones con un verbo infinito (“bombear agua”, transportar gente”, etc.).

Sin embargo, los usuarios no esperan solo que el activo cumpla con una función, también esperan que lo haga con un nivel de funcionamiento aceptable. Entonces la definición de una función no estará completa a menos que especifique el nivel de funcionamiento deseado por el usuario, tan precisamente como le sea posible. Por ejemplo: Bombear agua del tanque “X” al tanque “Y” con un flujo no menor a 800GPM. Este ejemplo muestra que una definición completa de una función consiste de un verbo, un objeto y el estándar de funcionamiento deseado por el usuario.

### **2.2 Estándares de funcionamiento.**

El objetivo del mantenimiento es asegurarse que los activos físicos continúen haciendo aquello que sus usuarios quieren que haga. La magnitud de aquello que los usuarios quieren que el activo haga puede definirse a través de un estándar mínimo de funcionamiento. Si pudiésemos construir un activo físico capaz de rendir según el funcionamiento mínimo sin deteriorarse en ningún modo, la maquina funcionaria continuamente sin necesidad del mantenimiento.

Las leyes de la física nos dicen que cualquier sistema organizado que es expuesto al mundo real se deteriorará. El resultado final de este deterioro es la



desorganización total (también conocida como “caos”) a menos que se tomen acciones para pausar el proceso que este causando el deterioro del sistema.

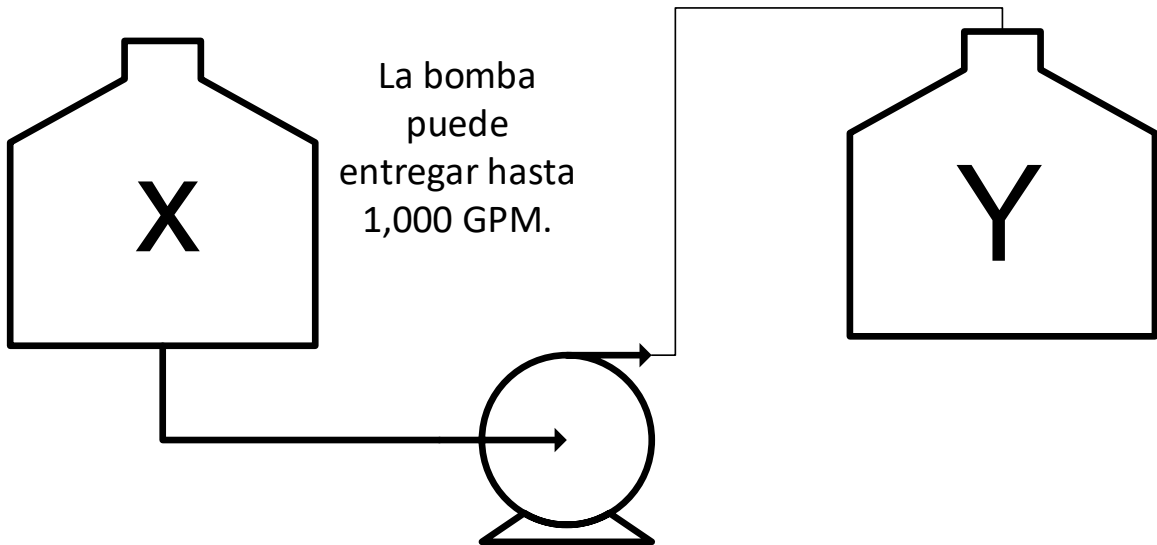


Fig. 2.1, Capacidad inicial vs funcionamiento deseado, fuente propia realizada en programa Microsoft Visio 2016.

Por ejemplo, la bomba de la figura 2.1 está bombeando agua hacia un tanque del que se saca agua a razón de 800GPM. Un proceso que causa el deterioro de la bomba (modo de falla) es el desgaste de las paletas. Esto sucede sin importar si está bombeando ácido o aceite lubricante, y sin que influye si las paletas están hechas de titanio o de acero. La única pregunta es cuánto tiempo le tomara deteriorarse al punto de no poder bombear los 800GPM.

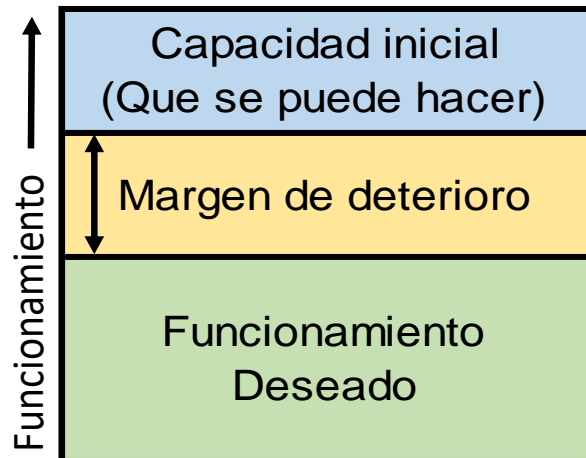


Fig. 2.2, Margen de deterioro, obtenida del libro Mantenimiento Centrado en Confiabilidad de John Moubray

Entonces si el deterioro es inevitable, debe ser tolerable, esto significa que cuando cualquier activo físico es puesto en funcionamiento debe ser capaz de rendir más que el estándar mínimo de funcionamiento deseado por el usuario. Lo que el activo

físico es capaz de rendir es conocido como “capacidad inicial” (o confiabilidad inherente). La figura 2.2 ilustra la relación correcta entre capacidad y el funcionamiento deseado.

Esto significa que el funcionamiento puede ser definido de las siguientes formas:

- Funcionamiento deseado o
- Capacidad propia (lo que se puede hacer).

### **2.3 Contexto operacional.**

En el capítulo #1 se definió RCM como un proceso utilizado para determinar los requerimientos de mantenimiento de cualquier activo físico en su contexto operacional, este contexto se inserta por completo en el proceso de formulación de estrategias de mantenimiento, comenzado por la definición de las funciones.

El contexto operacional también influye profundamente los requerimientos para las funciones secundarias. El contexto operacional no solo afecta drásticamente las funciones y las expectativas de funcionamiento, también afecta la naturaleza de los modos de falla que puedan ocurrir, sus efectos y consecuencias, la periodicidad con la que pueda ocurrir, y que debe hacerse para manejarlas.

Por ejemplo, consideremos nuevamente la bomba que se muestra en la figura 2.1, si fuese llevada a un lugar en el que deba bombear lodo medianamente abrasivo hacia un tanque Y a no menos de 900GPM. Este estándar de funcionamiento es más exigente que el de su ubicación anterior, por lo que también se eleva el estándar de mantenimiento. La naturaleza, frecuencia y gravedad de los patrones de fallas cambian al pasar de bombear agua a bombear lodo. Como resultado, aunque la bomba es exactamente la misma, en su nuevo contexto operacional muy probablemente termine con un programa de mantenimiento completamente diferente.

Todo esto significa que cualquiera que comience a aplicar el proceso RCM a cualquier proceso o activo físico debe asegurarse de tener un claro entendimiento del contexto operacional antes de comenzar. Algunos de los factores importantes que deben ser considerados son: Procesos por lotes y continuos, redundancia,

estándares de calidad, estándares medioambientales, riesgos para la seguridad, tiempos de operación entre otros.

### **2.3 Diferentes tipos de funciones.**

Todo activo físico tiene más de una función. Por lo general tiene varias. Si todo el objetivo del mantenimiento es asegurarse que continúe realizando estas funciones, entonces todas ellas deben ser identificadas junto con los parámetros de funcionamiento deseado. A primera vista, esto puede verse como un proceso bastante directo. Sin embargo, en la práctica, casi siempre se vuelve el aspecto desafiante y el que más tiempo toma en el proceso de formulación de estrategias de mantenimiento.

Esto es especialmente cierto en instalaciones antiguas. Cambian los productos, cambia la configuración de la planta, cambia la gente, cambia la tecnología y cambian las expectativas de funcionamiento, pero todavía encontramos activos en servicio que han estado allí desde que se construyó la planta. Definir precisamente que se supone que deben hacer dichos activos hoy en día, requiere de mucha cooperación entre la gente de mantenimiento y los operarios. Por lo general eso también es una experiencia profunda de aprendizaje para todas las personas involucradas en el proceso. Las funciones se dividen en dos categorías principales (funciones primarias y secundarias) y estas a su vez se dividen en varias subcategorías.

#### **2.3.1 Funciones Primarias.**

Las organizaciones adquieren activos físicos por una, probablemente dos y muy pocas veces tres o más razones. Estas razones son descritas por definiciones de funcionamiento. Se conocen como funciones primarias por ser la razón principal por la que es adquirido el activo físico. Son las razones por las cuales existe el activo, por lo que debemos definir las tan precisamente como sea posible.

Las funciones primarias son generalmente fáciles de reconocer. De hecho, el nombre de la mayoría de activos físicos industriales se basa en su función

primaria. Por ejemplo, la función primaria de una maquina empaquetadora es la de empaquetar objetos, y la de una trituradora es la de triturar, etc.

Para la mayoría de los tipos de equipos los parámetros de funcionamiento asociados a las funciones primarias, tienen que ver con velocidad, volumen, y capacidad de almacenamiento. Por lo general también necesita considerarse en esta etapa la calidad del producto.

Se sabe que, nuestra capacidad de alcanzar y mantener satisfactoriamente los estándares de calidad depende cada vez más de la capacidad y de la condición de los activos que producen los bienes. Dichos estándares están relacionados generalmente con las funciones primarias. Por esto, es esencial incorporar cuando corresponda, los criterios de calidad de producto en la definición de las funciones primarias. Esto incluye dimensiones de mecanizado, operaciones de conformado y ensamblado, estándares de pureza para alimentos, productos químicos y farmacéuticos, dureza para el caso de tratamientos térmicos, nivel de llenado o de peso de embalajes, etc.

**Diagrama de bloques.** Si un activo es muy complejo o si la interacción entre diferentes sistemas es difícil de interpretar, a veces es útil clarificar el contexto operativo usando diagramas de bloques. Estos son diagramas simples que muestran todas las funciones primarias de una empresa a cualquier nivel dado.

**Funciones primarias múltiples e independientes.** Un activo puede tener más de una función primaria, por ejemplo, el nombre mismo del avión caza/bombardero sugiere que tiene dos funciones primarias. En casos como este, ambas funciones deben listarse en las especificaciones funcionales.

Una situación similar suele encontrarse en fabricación donde un activo puede usarse para realizar distintas funciones en momentos diferentes. Por ejemplo, un reactor en una industria química puede usarse en distintos momentos para el reflujo de tres productos diferentes en condiciones diferentes como se muestra en la siguiente tabla:

Producto	1	2	3
Presión	2 bar	10 bar	6 bar
Temperatura	180°C	120°C	140°C
Tamaño del lote	500 litros	600 litros	750 litros

Tabla 2.1, Funciones de un reactor en momentos diferentes para la fabricación de productos diferentes, obtenida del libro Mantenimiento centrado en confiabilidad de John Moubray.

En casos como este, uno podría listar por separado una función por cada producto. Esto podría llevar lógicamente tres programas de mantenimiento para el mismo activo. Tres programas podrían ser posibles, talvez hasta deseables, si cada producto se fabricara continuamente durante periodos muy largos.

De cualquier modo, si el intervalo entre tareas de mantenimiento más espaciadas es más largo que los intervalos de cambios, se vuelve impráctico cambiar las tareas de mantenimiento cada vez que la máquina se reconfigura para producir un producto diferente.

Una forma de solucionar este problema es combinar los estándares de las peores condiciones de cada producto en una sola definición de función. En el ejemplo anterior, una combinación de definiciones de funciones podría resultar como “Reflujar hasta 750 litros de producto a una temperatura límite de 180°C y presiones límites de 10bar”

Esto lleva a un programa que podría traer aparejado cierto sobre mantenimiento durante algún periodo, pero que asegura que el activo puede soportar el peor esfuerzo al que será sometido.

### **Funciones primarias dependientes o en serie.**

Pueden encontrarse activos que son capaces de realizar dos o más funciones primarias en serie. Estas son conocidas como funciones en serie, por ejemplo, la función primaria de una maquina en una fábrica de alimentos puede ser “llenar 300 latas con comida por minuto” y luego “cerrar 300 latas por minuto”.

La diferencia entre funciones primarias múltiples y funciones primarias en series es que las primeras, cada función puede ser ejecutada independientemente de la otra, mientras en las segundas, una función debe ser realizada antes que las otras. En otras palabras, para que trabaje correctamente la maquina en la fábrica de alimentos, debería llenar las latas antes de cerrarlas.

### **2.3.2 Funciones secundarias.**

Es de suponer que la mayoría de los activos físicos cumplan una o más funciones adicionales además de la principal, estas se conocen como funciones secundarias. Por ejemplo, la función primaria del motor de un automóvil podría ser expresada de esta manera:

- Transportar hasta 5 personas a velocidades de hasta 140km/h a lo largo de caminos construidos.

Si esta fuera la única función del vehículo entonces el único objetivo del programa de mantenimiento de ese auto seria preservar su habilidad de transportar hasta 5 personas a velocidades de hasta 140km/h a lo largo de caminos construidos. Sin embargo, esta es solo parte de la historia, ya que la mayoría de sus dueños de automóviles esperan mucho más de sus vehículos, desde su capacidad de llevar equipaje, hasta su capacidad de indicar el nivel de combustible.

Para asegurarnos que ninguna de estas funciones sea pasada por alto, se dividen en siete categorías de la siguiente forma:

- Integridad ambiental.
- Seguridad.
- Control/ confort/ contención.
- Apariencia.
- Protección.
- Eficiencia y economía.
- Funciones superfluas.

Las funciones secundarias son usualmente menos obvias que las primarias, pero en ocasiones, la pérdida de una función secundaria puede tener serias consecuencias, incluso hasta más graves que la pérdida de una función primaria. Como resultado, las funciones secundarias frecuentemente necesitan poco o más mantenimiento que las funciones primarias, por lo que también deben ser claramente identificadas.

**Integridad ambiental:** sabemos que las expectativas medioambientales de la sociedad de han vuelto un factor crítico del contexto operacional de muchos activos. RCM comienza el proceso de cumplimiento de los estándares asociados con la definición de funciones, expresándolos apropiadamente. Por ejemplo, una función secundaria de un auto o de la chimenea de una fábrica, podría ser, “Contener menos X miligramos de una sustancia química determinada por metro cubico”. El sistema de escape de un auto también podría verse sujeto a restricciones ambientales relacionadas a la emisión sonora, y la especificación funcional asociada podría ser “Emitir menos de X dB medidos a una distancia Y metros de la salida de escape”.

**Seguridad:** La gran mayoría de los usuarios quieren estar razonablemente seguros que sus máquinas no les causaran ningún daño y menos aún la muerte. En la práctica, la mayoría de los riesgos para la seguridad surgen más adelante en el proceso RCM cuando se analizan los modos de fallas. No obstante, en ciertos casos es necesario listar funciones que traten con riesgos específicos. Por ejemplo, dos funciones relacionadas con la seguridad de una tostadora son “Prevenir que los usuarios puedan tocar componentes que tengan tensión eléctrica” y “No quemar a los usuarios”.

Existe un subconjunto de funciones relacionadas con la seguridad, que son aquellas que tratan con la contaminación del producto y la higiene. Estas pueden encontrarse principalmente en las industrias alimenticias y farmacéuticas. Los estándares de funcionamiento asociados por lo general se especifican rigurosamente dando lugar a rutinas de mantenimiento estrictas (limpieza y pruebas).

**Integridad estructural:** Muchos activos tienen funciones secundarias del tipo estructural. Estas por lo general comprenden funciones como la de sostener otro activo, otro subsistema u otro componente. Por ejemplo, la función primaria de una pared de un edificio, puede ser la de proteger a la gente y a los equipos de las inclemencias climáticas, pero también podría esperarse que las paredes soporten el techo (resistan el peso de estanterías y cuadros).

**Control:** En muchos casos, los usuarios no solo quieren que los activos cumplan con sus funciones con un determinado estándar de funcionamiento, sino que también desean poder regular dicho funcionamiento. Estas expectativas se extractan en funciones separadas. Por ejemplo, se había mencionado que la función principal de un auto era “Transportar hasta 5 personas a una velocidad de 140km/h en caminos pavimentados”. Una función de control asociada con esta función podría ser la de “Permitir al conductor regular la velocidad a voluntad entre -15km/h y +140km/h”.

Las formas de medición son un subconjunto importante de las funciones de control. Estas incluyen funciones que dan al operador información en tiempo real de las condiciones del proceso (manómetros, indicadores, axiometros y paneles de control), o que registran dicha información para un análisis posterior (dispositivos de grabación análogos o digitales, cajas negras de aviones, etc.). Los estándares de funcionamiento asociados con estas funciones no solo se relacionan con la facilidad con la que podría leer y asimilar o recuperar la información, sino que también se relacionan con hacerlo con precisión. Por ejemplo, la función del velocímetro de un auto puede describirse como “indicar al conductor la velocidad del auto con una precisión de  $\pm 5\%$  de la velocidad real.

**Contención:** En el caso de activos usados para almacenar cosas, su función primaria será la de contener lo que sea que almacene. No obstante, la contención podría considerarse también como una función secundaria de todos los dispositivos usados para transferir material de cualquier tipo, especialmente fluidos. Estos pueden ser cañerías, bombas, cintas transportadoras, tolvas, silos



y sistemas hidráulicos o neumáticos. La contención también es una función secundaria importante en ítems como cajas reductoras, transformadores.

**Confort:** La mayoría de las personas esperan que sus activos no les causen ansiedad, molestia o incomodidad. La función confort contiene este tipo de expectativas.

**Apariencia:** En muchos activos la apariencia engloba una función secundaria específica. Por ejemplo, la función primaria de una pintura en la mayoría de los equipos industriales es la de protegerlos de la corrosión, pero los colores brillantes pueden usarse para aumentar la visibilidad por razones de seguridad. De manera similar, la función principal de un cartel en la puerta de una fábrica es mostrar el nombre de la compañía, pero la función secundaria es la de reflejar la imagen de la compañía.

**Protección:** A medida que los activos se vuelven más complejos, la cantidad de formas en las que pueden fallar crece de forma casi exponencial. Esto trajo consigo un crecimiento en la variedad y la severidad de las consecuencias de las fallas. Para eliminar estas consecuencias, cada vez más se usan dispositivos de protección automáticos, estos dispositivos pueden trabajar de cinco maneras diferentes:

- Alertando al operario en caso de condiciones de funcionamiento anormales.
- Apagando el equipo cuando se produce la falla.
- Eliminando o minimizando las condiciones anormales que siguen a la falla y que de otra manera causarían un daño mayor.
- Reemplazando a la función que ha fallado.
- Previniendo la aparición de situaciones peligrosas.

El propósito de estos dispositivos es el de proteger de las fallas a la gente, o proteger a las máquinas o proteger a los productos, y a veces proteger a todos al mismo tiempo. Los dispositivos de protección aseguran que la falla de la función protegida será mucho menos seria que si no tuviera una protección. La existencia de protección también significa que los requerimientos de mantenimiento de la

función protegida serán mucho menos estrictos de lo que podría ser si no estuviese protegida.

**Economía / Eficiencia:** Cualquiera que usa un activo de la clase que sea, tiene recursos financieros finitos. Esto los lleva a poner un límite a lo que están preparados a gastar en su operación y mantenimiento. Cuanto están preparados a gastar, está determinado por una combinación de tres factores:

- La cantidad de recursos financieros actuales.
- Cuanto quieren que el activo haga por ellos.
- La disponibilidad y el costo de las formas alternativas de alcanzar el mismo fin.

Desde el punto de vista del contexto operativo, las expectativas funcionales relativas a los costos usualmente se expresan como presupuestos de gastos. Desde el punto de vista del activo, las cuestiones económicas pueden incluirse directamente en la definición de funciones que definirán las expectativas de los usuarios en relación a temas como la economía de combustible y la pérdida de material de proceso. Por ejemplo, se podría pedir a un auto “No consumir más de 6 litros de combustible por cada 100km. A una velocidad constante de 120km/h.”

**Funciones Superfluas:** A veces se encuentran ciertos componente u objetos que son completamente superfluas. Esto pasa por lo general cuando el equipo se ha modificado frecuentemente a lo largo del tiempo, o bien, cuando el equipo fue sobre especificado. Por ejemplo, una válvula reductora colocada en la línea de abastecimiento entre el colector de gas y la turbina de gas, la función original de la válvula era de reducir la presión de 120psi a 80psi. El sistema fue posteriormente modificado reduciendo la presión en el colector a 80psi, a partir del cual la válvula no cumple ningún propósito útil.

## **2.4 Como deben listarse las funciones.**

Una definición de función descrita adecuadamente, especialmente si es totalmente cuantificada, define con precisión los objetivos de desempeño. Esto asegura que todos los involucrados conocen exactamente que se desea, lo que a su vez asegura que las actividades de mantenimiento permanezcan enfocadas

hacia las necesidades reales de los usuarios. También ayudan a observar variaciones originadas por cambio de expectativas sin hacer obsoleto todo el entendimiento.

De acuerdo a la planilla de análisis de RCM realizada por PDM Consultores, las funciones principales se escriben primero y se enumeran en caso de ser más de una, como se muestra en la tabla, luego las funciones secundarias, todas ellas en las columnas de la izquierda (Estas funciones se aplican al sistema de escape de una turbina de gas).

Funciones Principales	
1	Dar salida sin restricción a todos los gases de escape calientes de la turbina hasta un punto situado a 10 metros por encima del techo de la sala de turbinas.

A)

Funciones Secundarias	
1	Reducir niveles de ruido del escape a un nivel ISO 30 a 150 metros de distancia.
2	Asegurar que la temperatura superficial de los conductores dentro de la sala de turbinas, no excede los 60°C.
3	Transmitir una señal de alarma al sistema de control de la turbina si la temperatura de los gases no excede los 475°C y una señal para apagar el equipo si excede los 500°C a cuatro metros de la turbina.

B)

Tabla 2.2, Enunciando funciones primarias (A) y secundarias (B), obtenida de la hoja de trabajo RCM de PDM consultores.

## Capítulo #3: Fallas Funcionales.

### 3.1 Falla

En el capítulo anterior se explicó que la capacidad inicial de un activo debe ser mayor que el estándar de funcionamiento deseado, de manera de poder cumplir con lo que los usuarios desean y admitir el desgaste. Por esto mientras la capacidad del activo continúe superando el estándar de funcionamiento deseado, el usuario va a estar satisfecho.

Sin embargo, si por alguna razón es incapaz de hacer lo que el usuario desea, este considerará que ha fallado, esto lleva a la definición básica de falla: *Se define “falla” como la incapacidad de cualquier activo de hacer aquello que sus usuarios quieren que haga [1].* Esto se muestra en la figura 3.1, por ejemplo, si la bomba que se muestra en la figura 2.1, es incapaz de bombear 800GPM, no le será posible mantener el tanque lleno y por lo tanto los usuarios consideran que “fallo”.

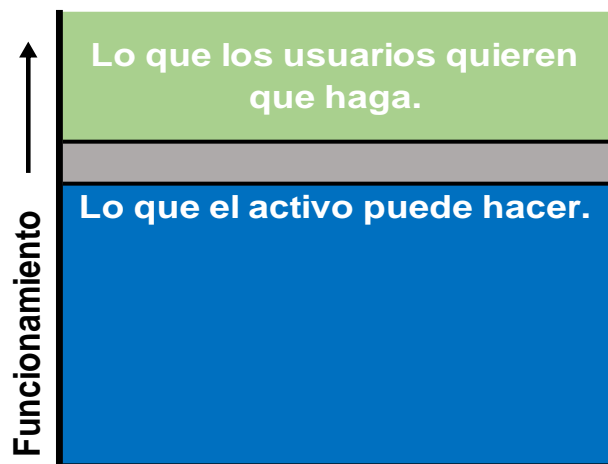


Fig. 3.1, Estado general de una falla, obtenida del libro de mantenimiento basado en confiabilidad.

### 3.2 Fallas Funcionales.

La definición antes mencionada trata el concepto de falla de la manera que se aplica a un activo como un todo. En la práctica, esta definición es un poco vaga, ya que no distingue claramente entre el estado de falla (falla funcional) y los eventos que causan este estado de falla (modos de falla). También resulta simplista, ya que no tiene en cuenta el hecho que cada activo tiene más de una función, y por lo general cada función tiene más de un estándar de funcionamiento deseado.

## Fallas y funciones.

Ahora sabemos que si un activo no hace aquello que sus usuarios quieren que haga, ha fallado. También sabemos que cualquier cosa que se deba hacer se define como una función y que cada activo tiene más de una y por lo general varias funciones diferentes. Así también, es posible que fallen todas y cada una de esas funciones, se deduce que todo activo puede ser afectado por diversos estados de falla diferentes. Por ejemplo, la figura 2.1, tiene al menos dos funciones. Una es la de bombear agua a no menos de 800GPM y la otra es contener agua. Es perfectamente posible que dicha bomba se capaz de bombear la cantidad requerida (no hay falla de la función primaria) a la vez que pierda una cantidad requerida (falla en la función secundaria). Por otra parte, es posible que la bomba se deteriore al punto de no poder bombear la cantidad requerida (falla de la función primaria), mientras que contiene el líquido (no hay falla en la función secundaria).

Esto muestra porque es más preciso definir una falla en términos de pérdida de una función específica, más que la falla del activo como un todo, también muestra que el proceso RCM utiliza el término “falla funcional” para describir estados de fallas y no a la falla por si sola. Sin embargo, para completar la definición de falla, se debe observar detenidamente el estándar de funcionamiento del activo.

## Estándares de Funcionamiento.

Se plantea que, el límite entre el funcionamiento satisfactorio y la falla, está determinada por el estándar de funcionamiento. Dado que este estándar de funcionamiento se aplica a funciones individuales, “falla” puede ser definida precisamente por la definición de falla funcional:

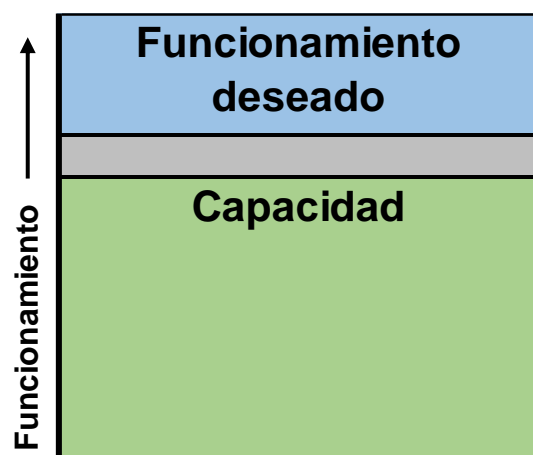


Fig. 3.2, Falla funcional, obtenida del libro de Mantenimiento basado en confiabilidad.

*Una falla funcional se define como la incapacidad de cualquier activo físico de cumplir una función según un parámetro de funcionamiento aceptable para el usuario. [2]*

Cuando hablamos de fallas funcionales, es importante considerar los siguientes aspectos: falla total o parcial, límites superiores e inferiores, contexto operacional e instrumentos de mediciones.

### **Falla total o parcial.**

La definición citada de una falla funcional cubre la pérdida total de la función, pero también abarca situaciones en las que el activo aun funciona, pero fuera de los límites admisibles. Por ejemplo, la función primaria de la bomba citada anteriormente se puede definir como “bombear agua del tanque X al tanque Y a no menos de 800GPM”, esta función podría sufrir dos fallos funcionales: no bombea nada de agua, bombea agua con flujo menor de 800GPM.

Una pérdida parcial de la función casi siempre proviene de modos de fallas diferentes de los que provocan una pérdida total de la función y las consecuencias casi siempre son diferentes, por esta razón deben registrarse todas las fallas funcionales asociadas a cada función.

La figura 3.3 muestra el comportamiento de una falla parcial, la falla parcial no se debe confundir con una situación en la que el activo, habiéndose deteriorado significativamente, aun esta sobre el nivel de funcionamiento requerido por el usuario, no obstante, si la capacidad del

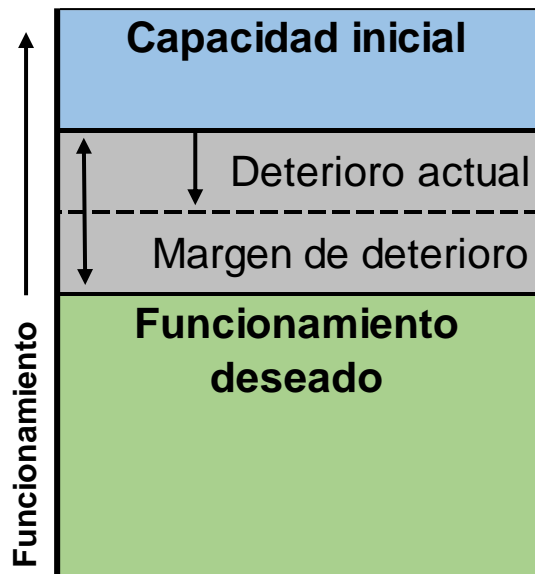


Fig. 3.3, El activo sigue estando bien a pesar de cierto deterioro, obtenida del libro Mantenimiento Basado en Confiabilidad.

activo se deteriora lo suficiente como para caer por debajo del funcionamiento deseado, sus usuarios consideran que fallo.

### **Limites superiores e inferiores.**

Se sabe que los estándares de funcionamiento asociados a algunas funciones incorporan límites superiores e inferiores, dichos límites significan que el activo ha fallado si se producen productos que están por encima del límite superior o por debajo del límite inferior. En estos casos la brecha del límite superior por lo general necesita identificarse por separado de la brecha del límite inferior. Esto se debe a que los modos de fallas y las consecuencias asociadas por exceder el límite superior suelen ser diferentes a las asociadas por no alcanzar el límite inferior. Por ejemplo, la función primaria de una máquina de envasadora de caramelos es “Empaquetar  $250 \pm 1$  gramos de caramelos a una velocidad mínima de 75 bolsas por minutos”. Esta máquina fallo si: se para completamente, empaqueta más de 251 gramos de caramelos en una bolsa, empaqueta menos de 250 gramos de caramelos en una bolsa, empaqueta a una velocidad menor de 75 bolsas por minuto.

Por supuesto, si un parámetro en particular tiene solamente un límite, solo puede tener un estado de falla, por ejemplo, la ausencia de un límite de rigurosidad inferior en el ejemplo dado sugiere que no es posible hacer que una pieza este demasiado pulida. En algunas circunstancias realmente esto podría no ser verdad con lo que debe tenerse cuidado al verificar este punto cuando se analizan funciones de este tipo.

### **Medidores e indicadores.**

Anteriormente, se mencionaron límites superiores e inferiores, pues a estos también se aplica los estándares de funcionamientos de medidores, indicadores, sistemas de control y protección. Dependiendo del modo de falla y sus consecuencias, también podría ser necesario tratar sus límites, por separado en el momento en que se listan las fallas funcionales. Por ejemplo, la función de un sensor de temperatura puede enunciarse como “mostrar temperatura del proceso X dentro de un rango de 2% de la temperatura real del proceso”. Este medidor

puede sufrir las siguientes tres fallas funcionales distintas: incapaz de mostrar temperatura del proceso, muestra una temperatura más de 2% más alta que la temperatura real del proceso, muestra una temperatura más de 2% menor que la temperatura real del proceso.

**Fallas funcionales y contexto operacional.**

La definición exacta de falla para cualquier activo depende en gran parte de su contexto operacional. Esto significa que de la misma manera que no debemos generalizar acerca de las funciones de activos idénticos, también debemos tener cuidado en no generalizar acerca de sus fallas funcionales. Por ejemplo, hemos visto que la bomba que se muestra en la figura 2.1 falla tanto si es incapaz de bombear agua o como si no fuera capaz de bombear hasta los 800GPM. Si la misma bomba se utiliza para llenar un tanque del cual se extraen 900GPM, el segundo estado de falla ya ocurre si su capacidad cae por debajo de los 900GPM.

**3.3 Como deben ser registradas las Fallas Funcionales.**

Las fallas funcionales se escriben en la segunda columna de la hoja de trabajo de información. Son codificadas alfabéticamente, como se muestra en la siguiente tabla (hablando siempre del subsistema de escape de la turbina de 5MW)

Funciones Principales		Fallos Funcionales.	
1	Dar salida sin restricción a todos los gases de escape calientes de la turbina hasta un punto fijo a 10m por encima del techo de la sala de turbinas.	A	Totalmente incapaz de conducir el gas.
		B	Flujo de gas restringido.
		C	Incapaz de contener los gases.
		D	No puede transportar los gases a un punto situado a 10m encima del techo.

A)



Funciones Secundarias.		Fallos Funcionales.	
1	Reducir los niveles de ruido del escape a un nivel ISO 30, a 150 metros.	A	El nivel de ruido excede del nivel ISO 30 a 150 metros.
2	Asegurar que la temperatura superficial de los conductos dentro de la sala de turbinas no exceda los 60°C.	A	La temperatura superficial del conducto es mayor a 60°C.

B)

Tabla 3.1, Ejemplo de registro de fallos funcionales obtenida de hoja de trabajo RCM de PDM Consultores.

## **Capítulo #4: Análisis de Modos de Fallas y sus Efectos (AMFE o FMECA)**

Ahora sabemos que, al definir las funciones y los parámetros de funcionamiento deseados de cualquier activo físico, definimos los objetivos de mantenimiento para dicho activo. También sabemos que definiendo las fallas funcionales podemos determinar exactamente que queremos decir con “falla”. Estas dos cuestiones son consideradas por las primeras dos preguntas del proceso de RCM mencionadas en el capítulo #1. Las siguientes 2 preguntas buscan identificar aquellos modos de fallas que sean posibles causantes de cada falla funcional, y determinar efectos de fallas asociados a cada modo de falla. Esto se realiza a través de un análisis de modos de fallas y efectos (AMFE o FMECA) para cada falla funcional.

### **4.1 ¿Qué es un modo de falla?**

Un modo de falla puede ser definido como cualquier evento que pueda causar la falla de un activo físico (o sistema). Sin embargo, tomando en cuenta el capítulo anterior, es poco profundo aplicar el término de “falla” a un activo físico de manera general. Es mucho más preciso distinguir entre una “falla funcional” (un estado de falla) y un “modo de falla” (evento que puede causar un estado de falla). Esta distinción lleva una definición más precisa de un modo de falla:

*Un modo de falla es cualquier evento que causa una falla funcional. [2]*

La mejor manera de mostrar conexión y la diferencia entre los estados de fallas y los eventos que podrían causarlos es primero hacer un listado de fallas funcionales, y luego registrar los modos de fallas que podrían causar cada falla funcional, como se muestra en la siguiente figura.

RCM II Hoja de información.		Sistema: Sistema de bombeo de agua de refrigeración.			
		Sub-sistema:			
Función		Falla Funcional		Modo de falla	
1	Transferir agua desde el tanque X al tanque Y a no menos de 800GPM.	A	Incapaz de transferir agua.	1	Cojinetes agarrotadas.
				2	Impulsor suelto.
				3	Impulsor trabado por un cuerpo extraño.
				4	El acople falla por fatiga.
				5	Motor quemado.
				6	Válvula de ingreso trabada en posición cerrada.
		B	Trasfiere menos de 800GPM	1	Impulsor gastado
				2	Línea de succión parcialmente bloqueada.

Fig. 4.1, Hoja de información de RCM de 1998 de Aladon LTD, donde se enlistan los modos de fallas de una bomba.

En esta figura también indica que, como mínimo, la descripción de un modo de falla debe consistir de un sustantivo y un verbo. La descripción debe ser lo suficientemente detallada para poder seleccionar una estrategia de manejo de falla apropiada, pero no tanto como para perder mucho tiempo en el proceso de análisis.

Los verbos que se usan para describir los modos de fallas deben elegirse cuidadosamente, ya que tienen una influencia muy fuerte en proceso posterior de selección de políticas de manejos de fallas. Por ejemplo, un término como “fallan los acoplamientos” no nos da ninguna pista sobre que podríamos hacer para

anticipar o prevenir la falla. Sin embargo, si decimos “los pernos de los acoplamientos están flojos” o “nodo de acoplamiento desgastado por fatiga”, se nos hace más sencillo identificar una tarea proactiva que pueda aplicarse. En el caso de válvulas e interruptores, también deben indicarse, si la pérdida de la función se da porque el ítem falla en posición abierta o en posición cerrada, por ejemplo, decir “Los contactos del interruptor se atascan en posición cerrada” da mucha más información que decir “el interruptor falla”.

## **4.2 ¿Por qué analizar los modos de fallas?**

Una maquina puede fallar por diversos motivos. Un grupo de máquinas o sistemas como una línea de producción puede fallar por cientos de razones, para una planta entera, los números de fallos ascienden a miles.

La mayoría de los gerentes no se siente muy cómodos al pensar en el tiempo y esfuerzo en identificar estos modos de fallos, pero cuando hacen esto, pasan por alto el hecho que en el día el mantenimiento es realmente manejado al nivel del modo de falla, por ejemplo:

- Las ordenes de trabajo o pedidos de trabajo surgen para cubrir los modos de fallas específicos.
- El planeamiento de mantenimiento diario se realiza para tratar modos de fallas específicos.
- En la mayoría de las empresas industriales el personal de mantenimiento y operaciones tienen reuniones cada día. Las reuniones casi siempre consisten en discusiones acerca de lo que ha fallado, que las causo, quien es responsable, que se está haciendo para reparar el problema y a veces, que se puede hacer para prevenir que vuelva a suceder.
- Generalmente, los sistemas de registros de historia técnica, registran modos de fallas individuales.

En la mayoría de los casos, los modos de fallas son discutidos, registrados y manejados luego de haber ocurrido. Tratar fallas después de que hayan ocurrido es por supuesto la esencia del mantenimiento reactivo. Por otro lado, el

mantenimiento proactivo significa manejar los eventos antes que ocurra, o al menos decidir cómo deberían ser manejados si llegaran a ocurrir. Para ello debemos saber por adelantado que eventos puedan ocurrir, los “eventos” en este contexto son los modos de fallas. Entonces si deseamos aplicar un mantenimiento verdaderamente proactivo a cualquier activo físico, debemos tratar de identificar todos los modos de fallas que puedan afectarlo. Lo ideal sería poder identificarlos antes que ocurriesen o al menos antes que vuelvan a ocurrir.

Una vez que cada modo de falla ha sido identificado es posible considerar que sucede y cuando ocurre, evaluar las consecuencias y decidir si debería hacerse algo para anticipar, prever, detectar, corregir o hasta rediseñar. Entonces el proceso de tareas de mantenimiento y gran parte del manejo de estas tareas, se lleva a cabo a nivel del modo de falla. Esto se ilustra brevemente con el ejemplo siguiente:

Consideremos nuevamente la hoja la hoja de información que se muestra en la figura 4.1, la figura 4.2, muestra que la bomba centrífuga es de acople directo, de una etapa y de aspiración axial y sellada con un sello mecánico. En este ejemplo vemos cerca de tres modos de falla que probablemente afectan solo el impulsor. Dichos modos de fallos se resumen en la figura 4.2.

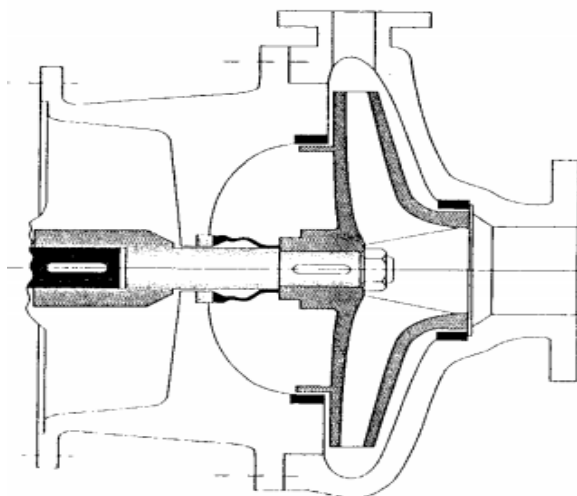


Fig. 4.2, Fallas de impulsor de una bomba centrífuga, obtenida del manual de gestión estratégica de mantenimiento.

**Impulsor desgastado:** probablemente sea un fenómeno relacionado con la edad, se puede manejar la falla cambiando los impulsores antes de que culmine su vida útil.

**Impulsor dañado por un cuerpo extraño:** el hecho que un cuerpo extraño aparezca en la línea de succión seguramente no tiene relación alguna con el tiempo que el impulsor ha estado en funcionamiento, entonces podemos decir que este modo de falla puede

ocurrir de manera aleatoria, entonces podríamos manejar la falla instalando una malla o filtro en la línea de succión.

**Impulsor suelto:** si el mecanismo de ajuste del impulsor está diseñado adecuadamente y el impulsor sigue soltándose, seguramente es porque no fue bien colocado. Si este es el caso, entonces quizás el modo de falla debería describirse como “Impulsor colocado incorrectamente”, esto significa que el modo de falla tiene más probabilidades de ocurrir al poco tiempo de estar funcionando, para manejar la falla, seguramente lo resolveríamos mejorando el entrenamiento o los procedimientos correspondientes.

Estos ejemplos refuerzan la idea que al nivel que manejamos el mantenimiento de cualquier activo físico no es el nivel del activo como un todo, ni el nivel del componente, sino, el nivel de cada modo de falla. Entonces antes de desarrollar una estrategia de mantenimiento para cualquier activo físico debemos identificar cuáles son esos modos de fallas o cuales podrían ser.

### **4.3 Efectos de las fallas.**

El cuarto paso en el proceso de revisión RCM consiste en hacer una lista de lo que de hecho sucede al producirse cada modo de falla. Esto se denomina efecto de falla.

*Los efectos de la falla describen que pasa cuando ocurre un modo de falla. [2]*

Las descripciones de estos efectos de fallas deben incluir toda la información necesaria para ayudar en la evaluación de las consecuencias de las fallas. Al describir los efectos de las fallas debe hacerse constar lo siguiente:

- La evidencia (si la hubiera) que se ha producido una falla.
- Las maneras (si las hubiera) en que la falla supone una amenaza para la seguridad o el medio ambiente.
- Las maneras (si las hubiera) en que afecta la producción o a las operaciones.
- Los daños físicos causados por la falla.
- Que debe hacerse para repararla.

## **Evidencia de las fallas**

Los efectos de las fallas deben describirse de tal forma que permita tomar decisiones, en circunstancias normales, será evidente para los operarios la pérdida de la función causada por ese modo de falla actuando por sí solo. Por ejemplo, la descripción debe indicar si la falla hace que se enciendan alarmas luminosas o de sonido. Asimismo, la descripción debe indicar si la falla va acompañada o precedida por efectos físicos obvios, tales como ruidos fuertes, incendio, humo, fugas de vapor, olores extraños, o fugas de líquidos, también se debe indicar si la máquina se detiene como consecuencia de la falla.

Cuando se describen los efectos de las fallas, no deben prejugarse la evaluación de las condiciones de las fallas usando palabras como “oculto” o “evidente”, esta es parte del proceso de evaluación de las consecuencias y si se usa de manera prematura podría influir de forma incorrecta en la evaluación.

## **Riesgos para la seguridad y el medio ambiente.**

El diseño de las plantas industriales modernas ha evolucionado de tal forma que solo una pequeña parte de los modos de fallas presentan una amenaza directa al medio ambiente, no obstante, si existe la posibilidad de los accidentes como consecuencia directa de una falla, o que haga que no se cumpla una normativa o reglamento del medio ambiente. Algunos ejemplos de esto son:

- Incremento del riesgo de incendios o explosiones.
- El escape de productos químicos peligrosos (gases, líquidos o sólidos).
- Electrocutión.
- Caída de objetos.
- Explosión o estallido.
- Exposición a materiales muy calientes o fundidos.
- Desintegración de grandes componentes rotativos.
- Exposición a objetos cortantes o accidentes vehiculares.
- Incremento de los niveles de ruido.
- Colapso de estructuras.

- Crecimiento bacteriano.

### **Daños secundarios y efectos de producción.**

La descripción de los efectos de falla debe aportar la máxima claridad posible para determinar cuáles son las consecuencias operacionales y no operacionales de la misma. Para hacer esto, debe indicar como y durante cuánto tiempo queda afectada la producción, generalmente tiene que ver con el tiempo de parada de la maquina ocasionado por la falla.

<b>Tiempo de parada de maquina.</b>						
La maquina se para.	Buscar a la persona que puede reparar.	Diagnosticar la falla.	Encontrar repuestos.	Reparar la falla.	Probar la maquina.	Volver a poner la maquina en servicio.
				<b>Tiempo de reparación</b>		

Fig. 4.3, Tiempo de parada de maquina vs tiempo de reparación, obtenida del libro de mantenimiento basado en confiabilidad.

En este contexto, el tiempo de para de la maquina es el tiempo total durante el cual la maquina probablemente permanece fuera de servicio en condiciones normales desde el momento en que se produce la falla hasta el momento en que la maquina nuevamente se encuentra totalmente operacional como lo indica la figura 4.3, esto generalmente es mucho más que el tiempo neto de reparación. El tiempo de parada de la máquina, puede variar mucho entre distintas ocasiones en que se da la misma falla. Es posible reducir las consecuencias operacionales de la falla tomando medidas para acortar el tiempo muerto, lo más común es reducir el tiempo que toma encontrar los repuestos. Si la falla no causa interrupción en el proceso, también debe ser registrado el tiempo promedio que toma reparar la falla, ya que esto puede ayudar a establecer los requerimientos de la mano de obra. Además, se deben listar cualquier otra forma mediante el cual la falla podría tener un efecto significativo sobre la capacidad operacional del activo, estas pueden ser:

- Como y cuanto afecta la calidad del producto y el servicio al cliente.



- Si origina detención de cualquier otro equipo o actividad.
- Si la falla lleva un incremento del costo operativo total además del costo de reparación.

### **Acción correctiva.**

Los efectos de las fallas también deben indicar que debe hacerse para reparar la falla. Esto debe incluirse cuando se indica el tiempo muerto como se muestra en los ejemplos siguientes:

- Tiempo muerto para remplazar los cojinetes, cerca de 4 horas.
- Tiempo muerto para limpiar el bloqueo y reseteo del interruptor, aproximadamente 30min.
- Tiempo muerto para desarmar turbina y remplazar el disco, aproximadamente 2 semanas.

## **4.4 Fuentes de información acerca de modos de fallos y efectos.**

Al considerar donde obtener la información necesaria para armar un análisis de modos y efectos de fallas (FMECA o AMFE), debemos recordar ser proactivos. Esto significa que debe darse tanto énfasis a lo que podría ocurrir como lo que ha ocurrido. Las fuentes de información más frecuentes se describen a continuación.

### **El fabricante o proveedor del equipo.**

Al llevar a cabo un análisis de modos de fallos y efectos, la primera fuente de información que nos viene a la mente es el fabricante. Sobre todo, en el caso de equipos nuevos. En algunas industrias se llegó al punto donde frecuentemente se les pide a los proveedores que como parte del contrato de venta de equipo incluyan un listado de fallas comprensivo (por ejemplo, los variadores de frecuencias). Además de otras cosas, estos pedidos suponen que el fabricante conoce todo lo que necesita saberse acerca de cómo puede fallar y que pasa cuando el equipo falla. En realidad, muy pocas veces esto no es así, en la práctica muy pocos fabricantes conocen la operación cotidiana del activo físico.

### **Listas genéricas de modos de fallas.**

Las listas de modos de fallas “genéricos” son listas de modos de falla, o a veces un análisis de fallos completo preparado por terceros. Pueden cubrir sistemas enteros, aunque frecuentemente cubren solo un activo físico o un solo componente. Estas listas genéricas a veces son consideradas como una manera de acelerar o “abreviar” esta parte proceso de desarrollo del programa de mantenimiento.

### **Las personas que operan y mantienen el equipo.**

En la mayoría de los casos, la mejor fuente de información para preparar un análisis de modos y efectos de fallos son las personas que día a día operan y mantienen el equipo. Ellos son los que más conocen el equipo el funcionamiento del equipo, acerca de que puede estar andando mal con el equipo, qué importancia tiene cada falla y que debe hacerse para repararla. Y si no lo saben, son ellos quienes tienen más razones para averiguarlo; por ello la mejor manera de capturar y recolectar estos conocimientos es haciendo que participen formalmente en el proceso de análisis.

### **4.5 Nivel de análisis.**

El nivel de detalle seleccionado debe permitir identificar una política de manejo de falla adecuada. Por lo general pueden usarse niveles altos (menor detalle) si el componente o subsistema admite a trabajar a rotura (run to failure) o bien realizar tareas de búsqueda de fallas, mientras que los niveles más bajos más bajos (más detalles) deben seleccionarse si el modo de falla puede estar sujeto a algún mantenimiento proactivo. El nivel de detalle que se usa para describir modos de fallas en las hojas de información también están influenciado por el nivel en el cual se lleva a cabo el análisis de modos de fallas y efectos, por eso mencionamos como afecta el nivel de detalles.

RCM II Hoja de información.		Sistema: Motor	
		Sub-sistema: Sistema de combustible.	
Función		Falla Funcional	Modo de falla
1	Transportar combustible desde e tanque de combustible al motor a razón de hasta 1 litro por minuto.	A	Totalmente incapaz de transportar combustible.
			1 No hay combustible en el tanque.
			2 Filtro de combustible obstruido.
			3 Línea del tanque tapada por un objeto extraño.
			4 Línea de combustible cortada.
			. ...Etc.

Fig. 4.4, Modos de fallas de un sistema de combustible en hoja de información de RCM II 1998 ALADON, obtenida del libro de mantenimiento basado en confiabilidad.

Por ejemplo, si se aplica RCM a un camión, ¿El activo es todo el camión? O ¿debemos subdividir el camión y analizar el sistema de tracción aparte de los frenos, de la dirección, del chasis, etc.? Este punto necesita tratarse con cuidado porque un análisis que se lleva a cabo a muy alto nivel termina siendo muy superficial, mientras que uno hecho a un nivel muy bajo se vuelve inentendible. A continuación, se explica las implicancias de realizar análisis a diferentes niveles.

### **Comenzando a un nivel bajo.**

Uno de los errores más comunes en el proceso RCM es llevar a cabo el análisis a un nivel muy bajo. Por ejemplo, cuando pensamos en los modos de falla que pueden afectar a un auto, posiblemente se nos ocurra que está bloqueada la línea de combustible. La línea de combustible es parte del sistema de combustible, con lo que parecería adecuado agregar este modo de falla en la hoja de información del sistema de combustible. La Figura 4.4 indica que, si el análisis se lleva a cabo

en este nivel, el bloqueo de la línea de combustible podría ser el tercer modo de falla sobre un total de quizás una docena que pueden causar la falla funcional "no transfiere nada de combustible". Esto parece ser bastante razonable si no tenemos en cuenta que el vehículo en realidad puede subdividirse literalmente en decenas de subconjuntos a este nivel de detalles. Si se lleva a cabo un análisis separado para cada subsistema, pueden aparecer los siguientes problemas:

- Cuanto más bajo se vaya en la jerarquía, más difícil se vuelve conceptualizar y definir estándares de funcionamiento.
- En un nivel bajo se vuelve igualmente difícil el visualizar y por ende analizar las consecuencias de falla.
- Cuanto más bajo sea el nivel, más difícil se vuelve identificar los componentes que conforman el sistema.
- Algunos modos de fallas pueden causar que muchos subconjuntos dejen de funcionar simultáneamente.

### **Comenzando desde arriba.**

En vez de empezar un análisis desde debajo de la jerarquía del equipo, podría comenzarse desde arriba. Por ejemplo, si declaramos la función primaria como "transportar hasta 40 toneladas de planchas de acero a velocidades de hasta 95km por hora, desde Managua hasta Chinandega con un tanque de combustible". La primera falla funcional asociada con esta función es "totalmente incapaz de moverse" cualquiera de los cuatro modos de fallos de la figura 4.4 podrían causar esta falla funcional, de modo que, a pesar de poder listarlos en la hoja de información del subsistema de combustible, pueden listarse en la hoja de información que cubre la totalidad del camión, como se muestra en la figura 4.5.

RCM II Hoja de información.		Sistema: Camión de 40Ton.			
		Sub-sistema:			
Función		Falla Funcional		Modo de falla	
1	Transportar hasta 40 toneladas de planchas de acero a velocidades de hasta 95km por hora, desde Managua hasta Chinandega con un tanque de combustible	A	Incapaz de transportar material.	...	...
				18	No hay combustible en el tanque.
				...	...
				73	Línea de combustible tapada.
				...	...
				114	Línea de combustible cortada.
				...	Etc.

Fig. 4.5, Modos de falla de un camión en hoja de RCM II 1998 ALADON, obtenida del libro de Mantenimiento Basado en Confiabilidad.

Las ventajas principales de comenzar el análisis de esta manera son las siguientes:

- Las funciones y expectativas son mucho más fáciles de definir.
- Las consecuencias de las fallas son mucho más fáciles de evaluar.
- Hay menos repetición de funciones y de modos de fallas.
- No es necesario hacer una hoja de información nueva para cada subsistema nuevo.

No obstante, la principal desventaja de realizar el análisis en este nivel es que hay miles de modos de fallas que podrían hacer que el camión no pueda avanzar.

## 4.6 ¿Cómo deben documentarse los modos de fallas y sus efectos?

Una vez que se estableció el nivel de todo el análisis RCM debemos decidir qué grado de detalle, se necesita para definir cada modo de falla encuadrado en dicho análisis. No hay razón técnica por la cual no puedan listarse todos los modos de fallas (junto con sus efectos) al nivel que permita seleccionar una política de manejo de fallas adecuada. Pero, aún a niveles intermedios, a veces generan demasiados modos de fallas por cada función, especialmente para funciones primarias, por lo general esto sucede cuando el activo tiene subconjuntos complejos que puedan tener muchos modos de fallas. Estos subconjuntos pueden manejarse de cuatro maneras.

- **Opción 1:** Listar de manera individual todos los modos de fallas de ocurrencia probable del subconjunto como parte del análisis principal. Por ejemplo, consideremos un activo que puede detenerse completamente por culpa de una falla de una pequeña caja reductora.

	Modo de falla.	Efectos de las fallas.
1	Se socan los cojinetes de la caja reductora.	Se detiene el motor y suena una alarma de control. Tiempo muerto para reemplazar la caja reductora es de 3 horas. Se ajustan los cojinetes en el taller.
2	Se despegan los dientes del engranaje.	El motor no se detiene, pero igualmente la maquina se para. Tiempo muerto para reemplazar la caja reductora es de 3 horas se cambian los engranajes en el taller.

Fig. 4.6 (A), Opción #1 sobre el nivel de detalles sobre los efectos de las fallas, obtenida del libro de mantenimiento basado en confiabilidad.

Por lo general, los modos de fallas que afectan a un subconjunto pueden incorporarse en un nivel de análisis más alto si el subconjunto no tiene más de

seis modos de fallas posibles a ser considerados y que puedan causar cualquier falla funcional del sistema a nivel superior.

- **Opción 2:** Listar las fallas del subconjunto como un modo de falla simple en la hoja de información, luego confeccionar una nueva hoja de información para analizar las funciones, fallas funcionales, modos de fallas y efectos del subconjunto. Tomando el ejemplo de la caja reductora puede enlistarse de la siguiente manera:

Modo de falla.		Efectos de las fallas.
1	Falla la caja reductora... Etc.	La caja reductora se analiza por separado.

Fig. 4.6 (B), Opción #2 sobre el nivel de detalles sobre los efectos de las fallas, obtenida del libro de mantenimiento basado en confiabilidad.

Por lo general es conveniente tratar a los subconjuntos de esta manera si tienen más de diez modos de fallas que puedan causar cualquier falla funcional del sistema principal (si existen entre 7 y 9 modos de falla funciona, puede usarse la opción #1 o #2 teniendo en cuenta que un análisis por separado implica más análisis, pero menos modos de fallas por análisis).

- **Opción #3:** Listar la falla del subconjunto en la hoja de información como un modo de falla simple. Por ejemplo, si se consideró apropiado tratar así la falla de la caja reductora, podría ser listado de la siguiente manera:

Modo de falla.		Efectos de las fallas.
1	Falla la caja reductora... Etc.	Se detiene el motor y suena alarma en la sala de control. Tiempo muerto para reemplazar la caja reductora es de 3 horas.

Fig. 4.6 (C), Opción #2 sobre el nivel de detalles sobre los efectos de las fallas, obtenida del libro de mantenimiento basado en confiabilidad.

Esta forma de tratar los subconjuntos solo puede adoptarse para un componente o subconjunto que tenga las siguientes características:

- Cuando la falla no está sujeta a un diagnóstico detallado ni rutinas de reparación.

- Es pequeño pero complejo.
- No tiene ningún modo de falla predominante.
- No es susceptible a ninguna forma de mantenimiento preventivo.

**Hoja de información sobre modos de fallos y sus efectos.**

Los efectos de falla se registran en la última columna de la hoja de información, junto al modo de falla correspondiente, como se muestra en la siguiente figura.



Función		Falla funcional.		Modo de falla.		Efectos de falla.
1	Conducir sin restricciones todos los gases calientes de la turbina hasta una altura de 10 metros por encima del techo de la sala de turbinas.	A	Incapaz de canalizar los gases.	1	Montantes del silenciador corridos.	El ensamble del selector colapsa y cae al fondo del conducto. La contrapresión hace que la turbina se acelere violentamente y se para por alta temperatura de escape. Tiempo de parada de máquina para remplazar el silenciador, hasta cuatro semanas.
		B	Flujo de gases restringido.	2	Se desprende parte del silenciador por fatiga.	Según la naturaleza del atasco, la temperatura de escape puede subir hasta parar la turbina. Partículas de desechos sueltas podrían dañar partes de la turbina. Tiempo de parada de máquina para reparar el silenciador, 4 semanas.
		C	No puede contener los gases.	3	Se agujera junta flexible por corrosión.	La junta flexible está dentro de la campana de la turbina, de modo que la mayor parte de la fuga de los gases de escape sería evacuado por el sistema de extracción

Fig. 4.7, Ejemplo de llenado de los modos de fallas y efectos, obtenida del libro de Mantenimiento Basado en Confiabilidad. [1]

## Capítulo #5: Consecuencias de las Fallas.

En el capítulo #1 se mencionó que el proceso RCM implica la formulación de siete preguntas acerca del activo seleccionado:

- ¿Cuáles son las funciones y los parámetros de funcionamiento asociados al activo actual en su contexto operacional?
- ¿De qué manera falla en satisfacer dichas funciones?
- ¿Cuál es la causa de cada falla funcional?
- ¿Qué sucede cuando ocurre cada falla?
- ¿En qué sentido es importante cada falla?
- ¿Qué puede hacerse para prevenir o predecir cada falla?
- ¿Qué debe hacerse si no se encuentra una tarea proactiva adecuada?

Las respuestas a las primeras cuatro preguntas se respondieron de forma tácita en los capítulos 2 a 4. En esos capítulos se mostró como se llena la hoja de información de RCM para documentar las funciones del activo que se está analizando, y como listar las fallas funcionales asociadas, los modos de fallas y sus efectos. Las últimas tres preguntas se refieren a cada modo de falla individual. Durante este capítulo hablaremos sobre la quinta pregunta: **¿De qué manera importa cada falla?**

### 5.1 Merece la pena la aplicación del RCM.

Cada vez que ocurre una falla en un activo físico, de alguna manera afecta a la organización que lo utiliza. Algunas fallas afectan la producción, la calidad del producto o la atención al cliente, otras representan un riesgo para la seguridad o el medio ambiente. Algunas incrementan los costos operativos, por ejemplo, al incrementar el consumo de energía, mientras que algunas tienen impacto en cuatro, cinco, o seis de estas áreas. Algunas otras aparentemente no tienen efecto alguno si ocurren por sí solas, pero ponen en riesgo a la organización, exponiéndola a fallas mucho más serias. Si cualquiera de estas fallas no es prevenida, el tiempo y el esfuerzo que se necesita para repararlas también afecta

a la organización, porque la reparación de fallas consume recursos que podrían ser mejor aprovechados en otras tareas más rentables.

La naturaleza y la gravedad de estos efectos de falla definen las consecuencias de la falla. En otras palabras, definen la manera en la que los dueños y los usuarios de los activos creerán que cada falla es importante. En los capítulos anteriores vimos que los efectos de la falla describen que sucede cuando ocurre, mientras que las consecuencias describen como (y cuanto) importa. Entonces podemos decir que, si podemos reducir los efectos de una falla en términos de frecuencia y severidad, estaremos reduciendo sus consecuencias. Si las consecuencias son serias, entonces se harán esfuerzos considerables para evitar, eliminar o minimizar sus consecuencias. Sobre todo, si la falla puede herir o matar a una persona, o si tiene efectos series sobre el medio ambiente. Esto también es válido si las fallas interfieren con la producción o las operaciones, o si pueden causar daños secundarios significativos, por otro lado, si la falla solo tiene consecuencias menores, es posible que no se tome ninguna acción proactiva y que la falla simplemente sea reparada una vez que ocurra.

Este enfoque sobre las consecuencias hace que RCM comience el proceso de selección de tareas asignando los efectos a cada modo de falla y clasificándolos dentro de una de las cuatro categorías definidas por RCM. El próximo paso es encontrar una tarea proactiva que sea físicamente posible de realizar y que reduzca, o que permita realizar una tarea que reduzca las consecuencias de la falla al punto que sea tolerable para el dueño o el usuario del activo. Si podemos encontrar dicha tarea se dice que es técnicamente factible. Si una tarea es técnicamente factible, podemos entonces pasar al tercer paso en el cual nos preguntaremos si realmente la tarea reduce las consecuencias de la falla a un punto que justifique los costos directos e indirectos de hacerla. Los costos directos son los costos de mano de obra o de los materiales necesarios para hacer la tarea y para hacer cualquier otro trabajo de reparación asociado; los costos indirectos incluyen los costos de todo tiempo muerto necesario para realizar la tarea; entonces si decimos que es técnicamente factible, merece la pena.

*Una tarea proactiva merece la pena si se reduce las consecuencias del modo de falla asociado a un grado tal que justifique los costos directos e indirectos de hacerla. [4]*

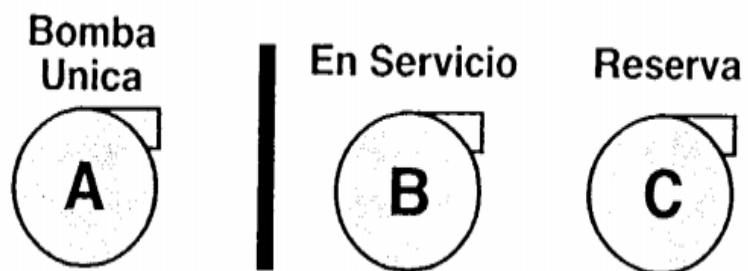
Ahora vamos a considerar los criterios utilizados para evaluar las consecuencias de las fallas, y así poder decidir si merece la pena realizar algún tipo de tarea proactiva.

## **5.2 Funciones ocultas y evidentes.**

Sabemos que todo activo tiene más de una función, y a veces decenas de funciones, cuando la mayoría de estas funciones fallan se hace evidente que ha ocurrido una falla. Por ejemplo, algunas fallas activan luces de advertencia, alarmas sonoras o ambas, otras hacen que se pare la máquina o que se interrumpa alguna parte del proceso. Otras dan lugar a problemas de calidad de producto o incremento de la energía consumida y otras van acompañadas de efectos físicos tales como ruidos, escapes de vapor, olores extraños o manchas de líquidos.

Por ejemplo, la figura 5.1, muestra tres bombas, si se traban los cojinetes de la bomba A, se pierde la capacidad de bombeo. Esta falla por si sola inevitablemente se manifestara a los operadores, tan pronto como suceda.

Las fallas de este tipo se clasifican de evidentes, porque tarde o temprano alguien se dará cuenta cuando se producen por si solas.



*Una función evidente es aquella cuya falla eventualmente e*

Fig. 5.1, Ejemplo de tres bombas para demostración de fallas ocultas y evidentes, tomada del Manual de Gestión Estratégica de Mantenimiento.

*inevitablemente se hará evidente por sí sola a los operadores en circunstancias normales. [2]*

No obstante, algunas fallas ocurren de tal forma que nadie sabe que el elemento se ha averiado a menos que produzca alguna otra falla. Por ejemplo, si fallase la bomba “C” de la figura 5.1, nadie se daría cuenta que ha fallado porque en circunstancias normales la bomba “B” seguiría funcionando. Es decir, la falla de la bomba “C” por si sola no tendría repercusiones directas a menos que la bomba “B” fallase (lo cual sería una circunstancia anormal). Es decir, no será evidente hasta que el equipo principal entre en fallo.

*Una función oculta es aquella cuya falla no se hará evidente a los operadores bajo circunstancias normales, si se produce por si sola. [2]*

Uno de los pasos de RCM es separa las funciones ocultas de las evidentes, porque las ocultas necesita un manejo especial. Dado que este tipo de funciones suman la mitad de los modos de fallas que pueden afectar a los equipos más modernos y complejos, las funciones ocultas podrían convertirse en el tema dominante del mantenimiento en los próximos diez años, sin embargo, para poner en perspectiva las funciones ocultas, primero consideremos las funciones evidentes.

### **Fallas evidentes.**

Las fallas evidentes se clasifican en tres categorías:

- **Consecuencia para la seguridad y el medio ambiente.** Una falla tiene consecuencias para la seguridad si puede lesionar o matar a alguien. Tiene consecuencias para el medio ambiente si puede infringir alguna normativa relativa del medio ambiente de carácter corporativo, regional, nacional o nacional.
- **Consecuencias operacionales.** Una falla tiene consecuencias operacionales si le afecta a la producción o a las operaciones (Volumen de producción, calidad del producto, servicio al cliente o costo operacional).
- **Consecuencias no operacionales.** Las fallas evidentes que caen dentro de esta categoría no afectan a la seguridad o a la producción, de modo que si involucran el costo directo de la reparación.

Con esta clasificación de las fallas evidentes, RCM garantiza que se consideran todas las repercusiones a la seguridad y el medio ambiente en todo modo de falla evidente. Mediante esta técnica RCM inequívocamente coloca a las personas antes que a la producción.

### **5.3 Consecuencias ambientales y para la seguridad.**

#### **La seguridad, ante todo.**

El proceso de RCM considera primero las implicancias ambientales y para la seguridad de cada modo de falla evidente, existen dos razones para esto:

- Día a día crece la convicción entre los empleados, empleadores y consumidores que es simplemente intolerable que durante el curso de los negocios se lesione o se mate a alguien y por lo tanto debe hacerse todo lo posible para minimizar la posibilidad de que ocurra cualquier tipo de incidente que pueda afectar a la seguridad o al medio ambiente.
- La comprensión pragmática que la probabilidad que sea tolerada para incidentes relacionados con la seguridad es de varios ordenes de magnitud menor a que aquellas que se toleran en fallas que tienen consecuencias operacionales. Como consecuencia de esto, en la mayoría de los casos en los que el punto de vista es la seguridad, vale la pena realizar una tarea proactiva, dicha tarea tiende a ser más adecuada desde el punto de vista operacional.

En cierto sentido, la seguridad se refiere a la seguridad de los individuos en su lugar de trabajo. Concretamente, RCM pregunta si alguien podría resultar lesionado o muerto, como resultado directo del modo de falla en si o bien como resultado de otro daño que pudiera ser ocasionado por la falla.

*Un modo de fallo tiene consecuencias para la seguridad si causa una pérdida de función u otros daños que pudieran lesionar o matar a alguien. [2]*

En otro nivel, la “seguridad” se refiere a la integridad o bienestar de la sociedad en general. Hoy en día las fallas que afectan a la sociedad tienen a clasificarse como problemas “ambientales”, de hecho, en muchas partes del mundo, las

organizaciones se adaptan a los requisitos ambientales de la sociedad, o se les prohíbe continuar con sus actividades. Por ende, el cumplimiento de las expectativas medio ambientales se está volviendo un requisito de supervivencia de las empresas.

*Un modo de falla tiene consecuencias ambientales si causa una pérdida de función u otros daños que pudieran conducir a la infracción de cualquier normativa o reglamento medio ambiental. [2]*

Notemos que al considerar si una falla tiene consecuencias ambientales o sobre la seguridad, estamos considerando que un modo de falla por si solo podría tener dicho tipo de consecuencias.

#### **5.4 Consecuencias operacionales.**

El efecto económico global de cualquier modo de falla que tiene consecuencias operacionales depende de dos factores:

- Cuánto cuesta la falla cada vez que ocurre, en términos de efecto sobre la capacidad operacional, más el costo de reparación.
- Con que frecuencia ocurre la falla.

En los capítulos anteriores no se mostró demasiado énfasis a la frecuencia probable de las fallas. Sin embargo, si las consecuencias de la falla son económicas, el costo total es afectado por la frecuencia con las que se producen dichas consecuencias. Es decir, para evaluar la trascendencia económica de estas fallas, debemos evaluar cuanto pueden costar a lo largo de un periodo de tiempo.

*Para modos de falla con consecuencias operacionales, merece la pena realizar una tarea proactiva si a lo largo de un periodo de tiempo, cuesta menos que el costo de las consecuencias operacionales más el costo de reparar la falla que pretende evitar. [4]*

Si no se puede encontrar una tarea proactiva que sea costo-eficaz, entonces no merece la pena realizar ningún mantenimiento proactivo para tratar de anticipar o prevenir el modo de falla en cuestión.

### 5.5 Consecuencias no operacionales.

Las consecuencias de una falla evidente que no ejerce un efecto adverso directo para la seguridad, el medio ambiente, o la capacidad operacional, son clasificados como no operacionales. Las únicas consecuencias asociadas con estas fallas son los costos de reparación, con lo que estas consecuencias también son económicas.

Por ejemplo, consideremos las bombas de la figura 5.2., En este ejemplo, la bomba de reserva se enciende cuando la bomba de servicio falla, con lo que la función de bombeo no se interrumpe. Por lo tanto, el único costo asociado a este modo de falla es el costo de reparación.

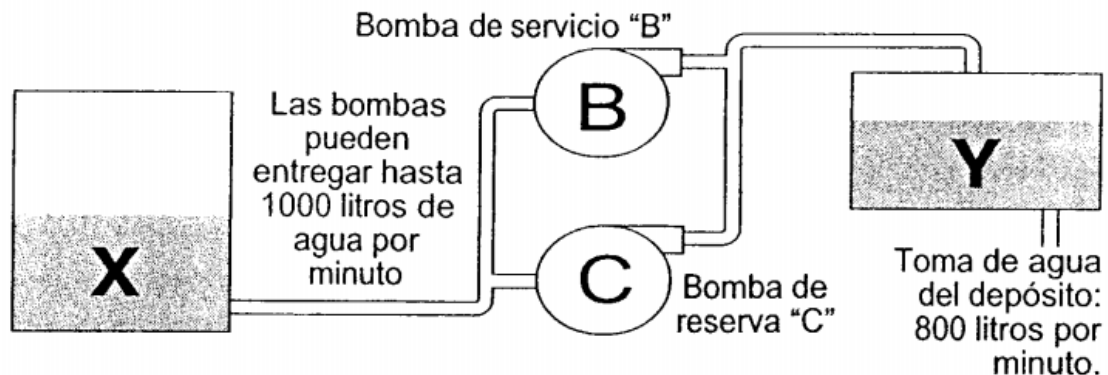


Fig. 5.2, Ejemplo de sistema de bombeo con equipo de Backup, obtenida del libro de Mantenimiento basado en confiabilidad.

*Para modos de falla con consecuencias no operacionales, merece la pena realizar tareas proactivas si, en un periodo de tiempo, cuesta menos que el costo de reparar las fallas que pretende prevenir. [4]*

### 5.5 Consecuencias de fallas ocultas.

En los capítulos anteriores menciono que los dispositivos de protección cada vez son más utilizados para intentar eliminar las consecuencias evidentes, y se explicó que esos dispositivos de seguridad funcionan de cinco maneras:



- Alertan a los operadores ante condiciones anormales.
- Detienen el equipo en caso de falla.
- Eliminan o alivian las condiciones anormales que siguen a una falla y que de otra manera podrían causar daños más serios.
- Asumen el control de una función que ha fallado.
- Previenen que surjan situaciones peligrosas.

La función esencial de estos dispositivos de seguridad es la de garantizar que las consecuencias de la falla de la función protegida sean mucho menos graves de lo que serían si no hubiera protección. Entonces cualquier dispositivo de seguridad es de hecho parte de un sistema con al menos dos componentes:

- El dispositivo de protección.
- La función protegida.

La existencia de tales sistemas crea dos tipos de posibilidades de fallas, dependiendo de si el dispositivo de seguridad tiene seguridad inherente o no.

*Un dispositivo con seguridad inherente es aquel cuya falla se vuelve evidente por sí misma al personal de operación en circunstancias normales. [2]*

## **5.6 Matriz de criticad.**

Dentro del contexto de la gestión del mantenimiento de una instalación y a partir de su configuración física (listado de sus posibles objetos mantenibles), se supondrá que cada uno de los componentes de la instalación puede averiarse, determinándose su probabilidad de ocurrencia asociado, bajo esta premisa, se deberá analizar posteriormente el potencial de impacto que se puede derivar de las averías de los dichos componentes. En este análisis, normalmente se evaluarán las posibles afecciones sobre el negocio (perdidas a la producción, daños a la instalación y costes de reparación), la seguridad de las personas y el medio ambiente.

En función de la probabilidad y la severidad estimadas, cada dispositivo de la instalación se situará en determinada posición de la matriz. Dependiendo de la

política de riesgos definida por la organización, los riesgos derivados de las averías consideradas se catalogarán en críticos o no críticos. De esta forma se tendrán categorizados o mejor dicho priorizados los distintos elementos de una instalación en función de la criticidad de su avería.

### ¿Cómo calcular la criticidad de los fallos?

Si bien dijimos el valor de prioridad define la posición en la matriz de criticidad, llamemos a este valor “Numero de prioridad de riesgo” (RPN), entonces diremos que:

$$RPN = \text{Ocurrencia del fallo} * \text{Severidad del fallo} * \text{Detectabiñidad del fallo}.$$

Ecuación 5.1, determina la posición de un fallo en la matriz de criticidad, obtenida del libro de gestión de mantenimiento.

Podemos otorgar un rango de valores a cada elemento del RPN, por ejemplo:

- La ocurrencia: se refiere a la frecuencia con la que sucede el fallo (tiempo estimado entre fallos) y pueden ser valores cualitativos del 1 al 3.

Ocurrencia	
Fallo muy probable.	3
Fallo probable.	2
Fallo muy poco probable.	1

Fig. 5.3, Valores cualitativos de la Ocurrencia de los fallos, obtenida del Gestión Estratégica del Mantenimiento. [2]

- Detectabilidad: hace referencia a si es detectable el fallo o quizás los síntomas del fallo (dependera del grupo que realiza el análisis).

Detectabilidad	
Indetectable.	3
Razonablemente detectable.	2
Seguramente detectable.	1

Fig. 5.4, Valores cualitativos de la Detectabilidad de los fallos, obtenida del Gestión Estratégica del Mantenimiento. [2]

- Severidad: con respecto a la severidad, esta toma en cuenta las consecuencias de los fallos que se mencionaron anteriormente en el

capítulo, a cada una de las consecuencias se le atribuyen valores del 1 al tres (costo de reparación, pérdidas de producción, seguridad y medio ambiente) entonces.

*Severidad*

$$= \frac{\text{Costo de reparación} * \text{Pérdidas de producción} * \text{seguridad} * \text{medio ambiente}}{4}$$

Ecuación 5.2, Cálculo de la severidad del fallo a partir de las consecuencias o afectaciones que este tiene sobre la empresa.

Cabe mencionar que estos valores son de carácter cualitativos.

De esta forma se calcula el RPN y la posición en la matriz de criticidad.

Escala de valores RPN			
Valor 1	Valor 2	Valor 3	RPN
1	1	1	1
1	1	2	2
1	1	3	3
1	2	2	4
1	2	3	6
2	2	2	8
1	3	3	9
2	2	3	12
2	3	3	18
3	3	3	27

	No crítico.		Crítico.
--	-------------	--	----------

Fig. 5.5, Matriz de criticidad de fallos, obtenida del Manual de Gestión Estratégica de Mantenimiento. [2]

## Capítulo #6: Diagrama de Decisión de RCM

Este capítulo describe el diagrama de decisión de RCM, que integra todos los procesos de decisiones en una estructura de estrategia única. Esta estrategia se muestra en la figura del Anexo A.3 y se aplica a cada uno de los modos de fallos listados en la hoja de información de RCM.

Hoja de decisión RCM II			Sistema:												
			Subsistema:												
Referencia de información			Evaluación de las consecuencias				H1	H2	H3	Acción a falta de					
F	FF	FM	H	S	E	O	S1	S2	S3	O1	O2	O3	H4	H5	S4
N1	N2	N3													
1	A	1													

Fig. 6.1, Hoja de decisión de RCM, obtenida del Manual de Gestión Estratégica de Mantenimiento.

### 6.1 Proceso de decisión del RCM.

La hoja de decisión de RCM se observa en la figura 6.2 durante este capítulo se demuestra como la hoja de decisión permite asentar las respuestas a las preguntas formuladas en el diagrama de decisión y en función de dichas respuestas registrar:

- Que mantenimiento de rutina será realizado, con qué frecuencia será realizado y quien lo hará.
- Que fallas son lo suficientemente serías como para justificar el rediseño.
- Casos en los que se toma la decisión de deliberada de dejar que las fallas ocurran.

La hoja de decisiones está dividida en dieciséis columnas, las columnas F, FF y FM identifican el modo de falla que se analiza en esa línea. Se utiliza para correlacionar las referencias de las hojas de información y las hojas de decisiones como lo muestra la figura 6.2.

Hoja de decisión RCM II			Sistema: Sistema de bombeo.							
			Subsistema:							
Referencia de Información.			Evaluación de las consecuencias.				H1	H2	H3	
F	FF	FM	H	S	E	O	N1	N2	N3	
1	A	1								

Fig. 6.2, Ejemplo de la hoja de decisiones RCM, obtenida del Manual de Gestión Estratégica de Mantenimiento. [2]

Los encabezamientos de las próximas diez columnas se refieren a las preguntas del diagrama de decisiones de RCM de la figura 6.1, de manera que:

- Las columnas tituladas H, S, E, O y N son utilizadas para registrar las respuestas a las preguntas concernientes a las consecuencias de cada modo de falla.
- Las tres columnas siguientes (H1; H2, H3, etc.) registran si ha sido seleccionada la tarea proactiva, y si es así, que tipo de tarea.
- Si se hace necesario responder cualquiera de las preguntas “a falta de”, las columnas encabezadas con H4 y H5, o la S4 son las que permiten registrar esas respuestas.

Las últimas tres columnas registran la tarea que ha sido seleccionada (si la hay), la frecuencia con la que debe hacerse y quien ha sido seleccionado para realizarla. La columna de tarea propuesta también se utiliza para registrar los casos en los que se requiere rediseño, si se ha decidido que el modo de falla no necesita mantenimiento programado.

En los siguientes párrafos vamos a explicar cada una de las cuatro secciones de la hoja de decisión en funciones de preguntas que se hacen en el diagrama de decisión.

## Consecuencias de falla.

Los significados precisos de las letras H, S, E y O, en la figura 6.1, son preguntas que se realizan para cada modo de falla, y las respuestas son registradas en la hoja de decisión basándose en lo que a continuación muestra la figura 6.4.

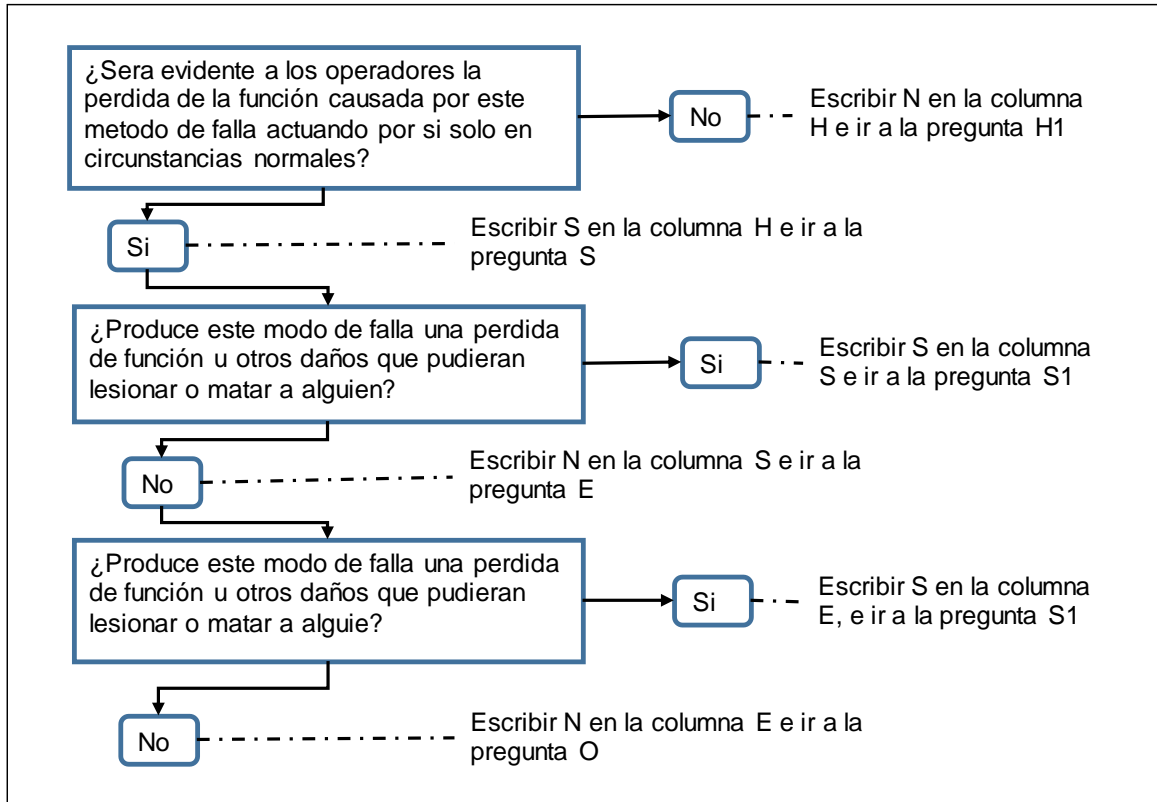


Fig. 6.3, Ejemplo de cómo funciona y cómo se registran las consecuencias de falla en la hoja de decisiones, obtenida del Manual de Gestión Estratégica de Mantenimiento. [2]

La figura 6.5 muestra cómo las respuestas a estas preguntas se registran en la hoja de decisión. Notemos que:

- Cada modo de falla es ubicado en solo una categoría de consecuencias. Entonces, si es clasificado como si tuviera consecuencias ambientales, no evaluemos también sus consecuencias operacionales. Esto significa que, por ejemplo, si se registra una “S” en la columna “E” no se registra nada en la columna “O”.
- Una vez que las consecuencias del modo de falla han sido categorizadas, el próximo paso es buscar una tarea proactiva adecuada. La Figura 6.5

también resume el criterio utilizado para decidir si merece la pena realizar tales tareas.

Referencia de			Evaluación de las				
F	FF	FM	H	S	E	O	
3	A	1	N	---	---	---	Una falla oculta: Para que merezca la pena realizarla, cualquier tarea preventiva debe reducir el riesgo de esta falla a un nivel tolerable.
5	B	2	S	S	---	---	Consecuencias para la seguridad: Para que merezca la pena realizarla, cualquier tarea preventiva debe reducir por si sola el riesgo de esta falla a un nivel tolerable.
2	C	4	S	N	S	---	Consecuencias para el medio ambiente: Para que merezca la pena realizarla, cualquier tarea preventiva debe reducir por si sola el riesgo de esta falla a un nivel tolerable.
1	A	5	S	N	N	S	Consecuencias operacionales: Para que merezca la pena realizarla, cualquier tarea preventiva a travez de un periodo de tiempo debe costar menos que el costo de las consecuencias operacionales mas el costo de reparación de la falla que pretende prevenir.
1	B	3	S	N	N	N	Consecuencias no operacionales: Para que merezca la pena realizarla, cualquier tarea preventiva a travez de un periodo de tiempo debe costar menos que el costo de reparación de la falla que pretende prevenir.

Fig. 6.4, Ejemplo de resumen de las consecuencias de una falla, realizadas en el diagrama de decisiones, tomada del manual de Gestión Estratégica de Mantenimiento.

### Tareas proactivas.

Las demás columnas son utilizadas para registrar si se ha seleccionado una tarea proactiva, de la manera siguiente:

- La columna titulada H1, S1, O1, N1, es utilizada para registrar si se pudo encontrar una tarea a condición apropiada para anticipar el modo de falla a tiempo como para evitar las consecuencias.

- La columna titulada H2, S2, O2, N2, es utilizada para registrar si se pudo encontrar una tarea de reacondicionamiento programado apropiada para prevenir las fallas.
- La columna titulada H3, S3, O3, N3, es utilizada para registrar si se puede encontrar una tarea de sustitución cíclica para prevenir las fallas.

En cada caso, una tarea solo es apropiada si merece la pena realizarla y si es técnicamente factible. En esencia, para que una tarea sea técnicamente factible. En esencia, para que una tarea sea técnicamente factible y que merezca la pena realizarla, esta debe dar una respuesta positiva a todas las preguntas que se muestran en la figura 6.6.

H1	H2	H3	
S1	S2	S3	
O1	O2	O3	
N1	N2	N3	
S			<p>¿Es técnicamente factible realizar una tarea para detectar si está ocurriendo una falla o está a punto de ocurrir? : LHay alguna clara condición de falla potencial? ¿Cuál es? ¿Cuál es el intervalo P-F? ¿Es suficientemente largo como para ser de utilidad? ¿Es razonablemente consistente? ¿Es posible hacer la tarea a intervalos menores al intervalo p-F?</p>
N	S		<p>¿Es técnicamente factible realizar una tarea de reacondicionamiento programado para reducir la frecuencia de la falla (evitar todas las fallas en el caso en que afecte la seguridad)? ¿Hay una edad en la que aumenta rápidamente la probabilidad condicional de falla? ¿Cuál es? ¿Ocurren la mayoría de las fallas después de esta edad (todos en el caso de consecuencias para la seguridad o el medio ambiente)? ¿Restituirá la tarea la resistencia original a la falla?</p>
N	N	S	<p>¿Es técnicamente factible realizar una tarea de sustitución cíclica para reducir la frecuencia de la falla (evitar todas las fallas en el caso de que afecte a la seguridad)? LHay una edad en la que aumenta rápidamente la probabilidad condicional de falla? ¿Cuál es? ¿Ocurren la mayoría de las fallas después de esta edad (todos en el caso de consecuencias para la seguridad o el medio ambiente)?</p>

Fig. 6.5, Criterios de factibilidad técnica, obtenida del Manual de Gestión Estratégica de Mantenimiento.



Si se selecciona una tarea, se registra una descripción de la tarea y la frecuencia con la que se debe ser realizada, así los analistas avanzan hacia el próximo modo de fallo.

### **Tarea propuesta.**

Si durante el proceso de toma de decisiones se ha seleccionado una tarea proactiva o una tarea de búsqueda de falla, debe registrarse la descripción de la tarea en la columna titulada “tarea propuesta”. Lo ideal es que la tarea fuese descrita con el mismo detalle y precisión en la hoja de decisión como en el documento que se le entregara a la persona que debe realizar la tarea. Si esto no es posible, la tarea debe ser al menos descrita con el detalle suficiente como para que quede absolutamente clara para quien escriba la descripción detallada. Si el proceso de decisión lleva a un cambio de diseño, entonces la tarea propuesta debe proveer una descripción breve del cambio de diseño. La forma real del nuevo diseño debe dejarse en manos de los diseñadores.

### **Puede ser realizado por.**

La última columna en la hoja de decisión se utiliza para anotar quien debe hacer cada tarea. Notemos que el proceso de RCM considera este tema para un modo de falla a la vez. En otras palabras, no aborda el tema con ninguna idea preconcebida acerca de quién debe hacer el trabajo de mantenimiento, simplemente pregunta quien es competente y confiable para realizar correctamente esta tarea. La respuesta puede ser absolutamente cualquiera, las tareas pueden ser adjudicadas a mantenimiento, operadores, personal de calidad, técnicos especializados, proveedores, inspectores de estructuras o técnicos de laboratorios.

## **6.2 Llenado de la hoja de decisión.**

Para ilustrar como debe ser llenada la hoja de decisión, consideremos tres modos de fallas. Ellos son:

- Rodamiento atorado, en una bomba que no tiene equipo de respaldo.
- Rodamiento atorado, en una bomba idéntica que tiene un equipo de respaldo.

- La falla de la bomba de reserva contemplada como un todo contemplada como un todo.

Referencia de información.	Evaluación de consecuencias.				H1 S1 O1 N1	H2 S2 O2 N2	H3 S3 O3 N3	Tarea Propuesta	Intervalo Inicial	A realizar por
	F	FF	FM	H						
1	A	1	S	N	S			Verificar si el cojinete principal de la bomba hace ruido, mediante ruta de inspección.	Semanal	Mecánico
1	A	1	S	N	N		N	Ningún mantenimiento programado.	N/A	N/A
2	A	1	N		N		N	Arrancar la bomba de reserva en vez de la bomba de servicio y asegurar que la bomba de reserva sea capaz de llenar el tanque. Completada la prueba, volver a poner en marcha la bomba de servicio.	Cada 4 semanas	Operador

Fig. 6.7, Hoja de decisión RCM con entradas de muestra.

## **Capítulo #7: Aplicación de Metodología RCM.**

Es importante mencionar que el proceso de RCM aún no es algo normado o la secuencia del proceso no está estandarizado por alguna norma, diferentes autores como John Moubray, Antony Smith, Otto Stier o la Norma ISO 14224 realiza diferentes procedimientos durante el estudio.

Para la aplicación de este análisis, realizaremos la secuencia de pasos propuesta por PDM Consultes, esta secuencia fue aprobada por la Gerencia de Fábrica de Monte Rosa.

El primer paso antes de aplicar de la metodología será RCM vamos a describir un poco el Proceso de Energía o mejor dicho “La Planta Eléctrica Monte Rosa”.

### **7.1 Contexto operacional de la Planta Eléctrica Monte Rosa y mapeo del proceso.**

El Ingenio Monte Rosa está ubicado en el departamento de Chinandega, municipio de El Viejo, en el kilómetro 148.5 en la carretera El Viejo – Potosí. El negocio principal del ingenio es la producción de azúcar y los negocios secundarios son la venta de energía y melaza. Para la producción del azúcar el ingenio utiliza un sistema de cogeneración de energías (aprovechamiento de dos tipos de energías). Cuenta con sistema de calderas que produce vapor de 900 Psi, la cual es inyectado a través de unas dos turbinas de escape, estas aprovechas la energía cinética del vapor para la producción energía; una vez cumplida la función del vapor en la turbina, este es extraído de la misma con una presión menor de 23.2 Psi, el cual es inyectado a la fábrica, aprovechando las temperaturas para poder realizar una separación del agua con la melaza por medio de transferencias de calor, de esto se deduce que la venta de energía está ligada a la cantidad de vapor que demanda la fábrica para sus actividades. Por otro lado, el Ingenio Monte Rosa, como negocio secundario de venta de Energía, este se plantea metas de ventas de energía, para ello cuenta con un turbogenerador de condensación (Este turbogenerador no está ligado a la demanda de vapor de la fábrica) con el fin de incrementar la venta de energía.

El ingenio Monte Rosa cuenta con dos periodos de producción, El periodo de zafra o producción de azúcar y el periodo de generación. Durante el periodo de zafra, la

prioridad son los turbogeneradores de escape, la cual aprovechan al máximo el vapor proveniente de las calderas, el turbogenerador se mantiene en línea consumiendo el sobrante de producción de vapor de las calderas, es decir si la demanda de vapor de la fábrica baja, hay un menor consumo de vapor por los turbogeneradores de escape, la cual este vapor no consumido lo aprovecha el turbogenerador de condensación incrementando la venta. Para el periodo de “generación” ha cesado la producción de azúcar, pero el ingenio mantiene reservas de combustible (bagazo) la cual utiliza para generar y vender energía por medio del turbogenerador de condensación.

De este contexto operativo podemos deducir el siguiente diagrama de flujo de la Planta Eléctrica Monte Rosa.

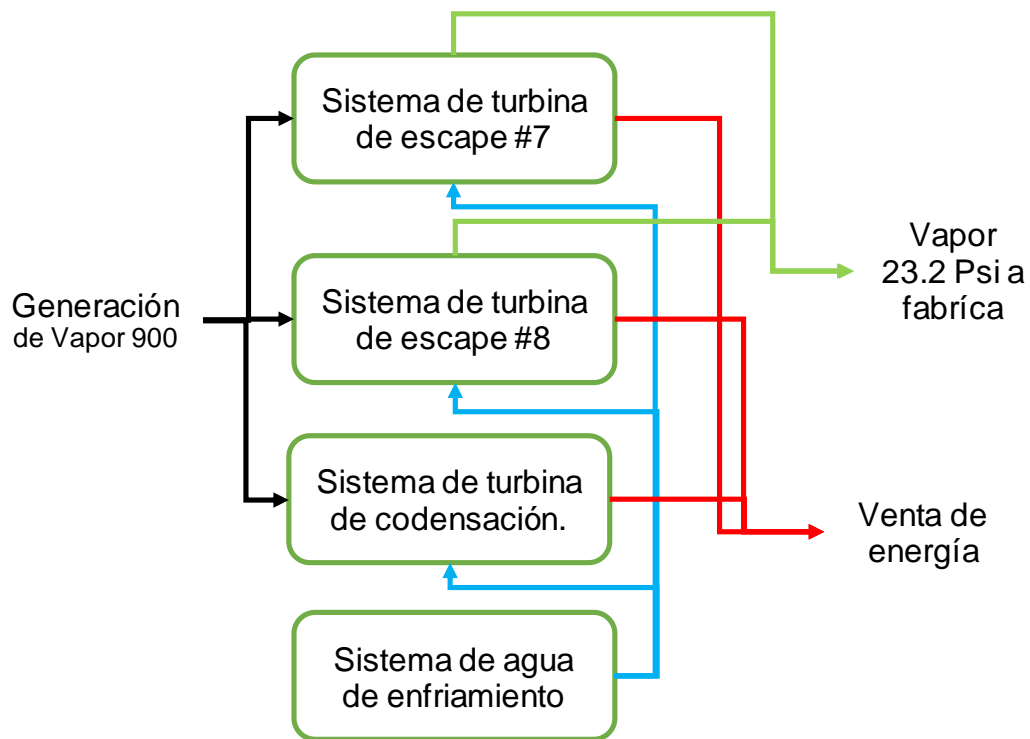


Fig. 7.1, Diagrama de flujo de los subsistemas de la Planta Eléctrica Monte Rosa, fuente propia.

Con la ayuda del Coordinador del Proceso, la ficha técnica EN-609-15 y la definición del contexto operativo, pudimos obtener otros datos sobre insumos,

función principal y secundaria la Planta Eléctrica Monte Rosa, estos son mostrados en la figura 7.2

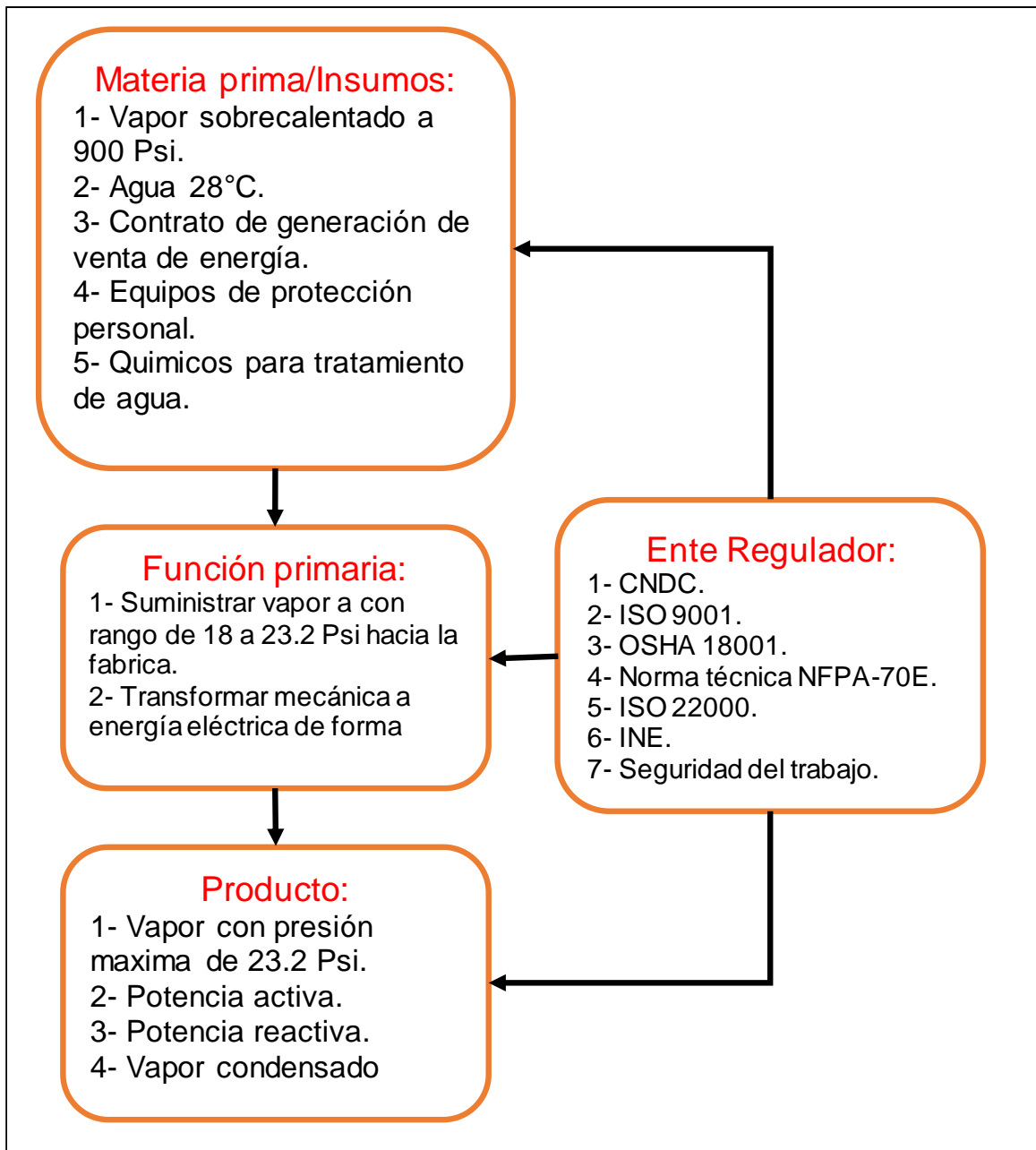


Fig. 7.2, Esquema funcional de la Planta Eléctrica Monte Rosa, obtenida de la ficha técnica EN-609-15.

## 7.2 Análisis de Criticidad de Alto Nivel.

Existe un paso que debe realizarse para saber a qué sistema es más conveniente aplicar esta metodología, de manera tal que el beneficio sea mayor. Sabemos que las gravedades de las fallas se miden a través de un sistema llamado matriz de la criticidad, si bien esto es aplicado a los fallos de los equipos, para poder detectar que subsistema es más crítico, lo aplicaremos a los subsistemas del proceso que se pretende analizar y lo llamaremos “Análisis de criticidad de alto nivel” (Este paso se realizara con el fin de identificar una oportunidad de aplicación de la metodología RCM). Entonces diremos que:

$$\text{Criticidad del sistema} = \text{Severidad} * \text{Ocurrencia de fallos}.$$

Ecuación 7.1, Calculo de criticidad de alto nivel para un subsistema o proceso.

*La ocurrencia de fallos refiere a la frecuencia con la que ocurre un mismo tipo de fallos.*

Luego diremos que:

$$\text{Severidad} = \text{Costo de reparación} + \text{Perdidas de producción}$$

Ecuación 7.2, Calculo de la severidad, donde las por producción son el producto de las horas de tiempo perdido y el coste por hora, a diferencia del cálculo de la severidad para la matriz de criticidad, esta descarta los costes por afectación al medio ambiente o la seguridad.

Por cortesía del ingenio Monte Rosa, se nos proporcionó los siguientes datos para efectos del estudio sobre los costes de reparaciones por fallos del subsistema de generadores de escape y subsistema de generador de condensación. Estos datos fueron descargados del programa de gestión de mantenimiento “SAP NETWOK” que utiliza la empresa.

Subsistema	Costo promedio por fallo.	Ocurrencia de fallas.	Tiempo perdido por falla.	Afectaciones de producción	Coste / hora
Turbogenerador de condensación.	U\$ 1,181.43	123	4 horas	100%	U\$1,186.00
Turbogeneradores de Escape	U\$714.75	53	2 horas	100%	U\$2,300.00
Estos datos corresponden al ciclo 18/19.					

Tabla 7.1, Datos de fallos de los turbogeneradores en la Planta Eléctrica Monte Rosa, suministrada por la misma empresa.

Observaciones: Si bien vimos en la figura 7.1, el proceso de Energía o la planta eléctrica como tal, esta subdivida en tres subsistemas o mejor dicho contiene tres turbogeneradores. En el software toma en cuenta ambos turbogeneradores de escapes como un solo subsistema, por ende, el dato de ocurrencia de fallos, es la suma de veces que han fallado ambos turbogeneradores de escape.

Realizando el análisis, la severidad de estos fallos para el subsistema del turbogenerador de condensación sería igual a:

$$Severidad = 1,181.43 + (4h * 100\% * 1,886) = U\$ 5,925.43$$

$$Entonces: Criticidad del sistema = U\$5,925.43 * 123 = U\$ 728,827.89$$

En el caso de la criticidad para los subsistemas de turbogeneradores de escape:

$$Severidad: 714.75 + (2h * 100\% * 2,300) = U\$ 5,314.00$$

$$Criticidad del subsistema = 5,314.00 * 53 = U\$ 281,642.00$$

De ambos resultados mostrados en la tabla 7,2, podemos observar que los costes por fallas en el subsistema del turbogenerador de condensación son mucho casi tres veces más altos que los costos por fallas de ambos turbogeneradores de escape, razón por la cual aplicaremos el análisis en este subsistema.

Análisis de Criticidad de Alto Nivel.							
Proceso	Costo de reparación	Pérdidas de producción			Severidad	Ocurrencia de fallos	Criticidad del Sistema
		Tiempo perdido.	Coste/horas	% de Afectación			
Turbogenerador de Condensación	U\$1,181.43	4 h	U\$1,186.00	100%	U\$5,925.43	123	U\$728,827.89
Turbogeneradores de Escape	U\$714.00	2 h	U\$2,300.00	100%	U\$5,314.00	53	U\$281,642.00

Tabla 7.2. Resultados de los cálculos de Análisis de Criticidad de alto Nivel, fuente propia.

Otro dato importante que refuta la necesidad de aplicar el análisis RCM en el Turbogenerador de condensación es la curva 7.3, donde se muestran los costos por reparaciones de ambos subsistemas durante los últimos 4 años.

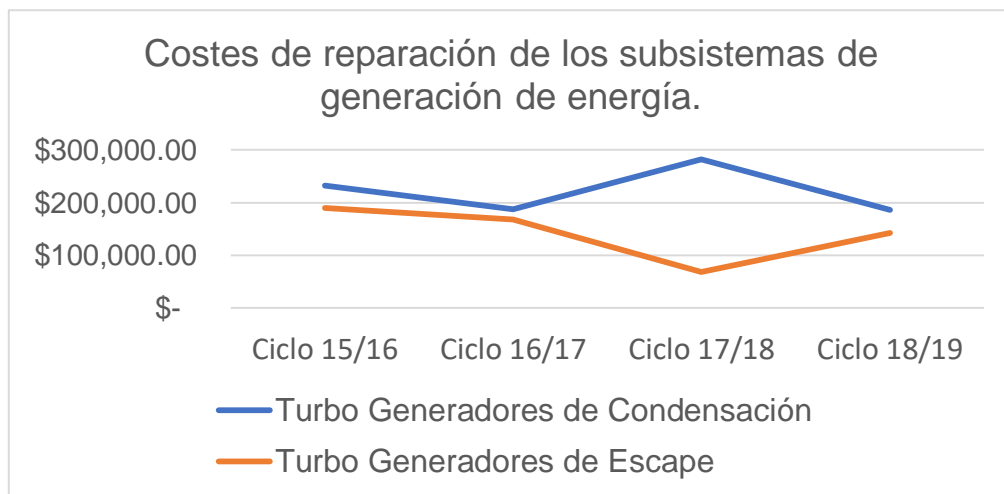


Fig. 7.3, Curva de costos por fallas de los turbogeneradores en la Planta Eléctrica Monte Rosa, facilitada por la empresa.

De esta curva podemos observar que durante los últimos ciclos el turbogenerador de condensación incurre más en costos por fallas.



## 7.2 Análisis Funcional

El objetivo de esta fase es la descripción general del aporte del sistema dentro del proceso completo. Aquí se identificará las aplicaciones del sistema al producto, los aspectos generales del contexto operativo como régimen de operación, políticas de mantenimiento y en general cualquier detalle que requiera ser del dominio del grupo multidisciplinario de trabajo a efectos de tomar en cuenta en la definición de los modos de fallo, más adelante en el proceso de análisis RCM.

### **Descripción del subsistema y su contexto operativo.**

El subsistema del turbogenerador de condensación está compuesto por tres etapas de transmisión de potencia, un sistema de lubricación de componentes rotativos y un sistema de condensador de vapor. Estos son:

- Turbina de vapor modelo TMC 25,000 marca TGM.
- Reductor de velocidad ratio 63:1 marca RENK ZANINI.
- Generador síncrono de 16.4MW de potencia marca TGM.
- Sistema de lubricación de aceite ISO 68.
- Condensador de vapor de 24,000GPM.

Como se mencionó en el contexto operacional de la Planta Eléctrica Monte Rosa. El turbogenerador de condensación tiene la finalidad de elevar la venta de energía, pero durante el periodo de zafra. Durante el periodo de zafra, la prioridad son los turbogeneradores de escape, ya que estos suministran vapor hacia la fábrica para actividades de evaporaciones, calentamiento de material, etc. Por otro lado, el turbogenerador de condensación funciona con ciclo cerrado, el vapor que es inyectado a la turbina, hace girar a la misma, convirtiendo la energía cinética del vapor en energía mecánica, esta gira a revoluciones de 6,000RPM, transmitiendo la energía mecánica hacia un reductor de velocidad, el cual, reduce la velocidad de los 6,000RPM a 1,800RPM, velocidad necesaria para que el generador logre sincronizarse al sistema interconectado a una frecuencia de 60Hz. Una vez que el vapor cumple su función en la turbina, este es enviado a un proceso de condensación de vapor por medio de transferencia de temperatura; luego el vapor

condensado es enviado nuevamente hacia las calderas para ser convertido nuevamente en vapor.

Si bien dijimos que la prioridad son los turbogeneradores de escape, es debido a que el proceso de generación de vapor no tiene la capacidad para abastecer de vapor a las tres turbinas a su capacidad nominal. La capacidad de generar vapor de las calderas es apenas de 600klb/h de vapor, de este vapor, la turbina de escape #8, con su potencia nominal de 15.5MW, consume alrededor de 192klb/h, la turbina de escape #7 tiene una capacidad nominal de 20MW, consumiendo 290klb/h, por otro lado, la turbina de condensación consume 203klb/h (este consumo actual es por la ineficiencia que presenta el subsistema). Debido a la demanda de vapor que tiene la fábrica, los turbogeneradores de escape se mantienen a su carga nominal, consumiendo la mayor parte del vapor suministrado por las calderas, El resto del vapor sobrante es aprovechado por el turbogenerador de condensación, manteniendo rangos de carga de 12MWh a 14MWh.

Lo antes mencionado, es durante el periodo de zafra, existe una temporada llamada "Generación", esta tiene como objetivo cumplir con la meta de venta de energía propuesta en el año, durante este periodo la fábrica queda fuera de línea y solo se mantiene en función el turbogenerador condensación, ya que este funciona con ciclo cerrado de vapor, no tiene problemas si la fábrica, no está en función y por ende tiene toda la disponibilidad del vapor producido por las calderas, esto hace que el subsistema se mantenga funcionando a plena capacidad de 16.4MW. Actualmente este subsistema no puede llegar a su capacidad nominal por problemas de eficiencia.

### **Funciones y fallas funcionales.**

Gracias al conocimiento adquirido en los capítulos #2 y #3, podemos establecer los requerimientos que se necesitan del turbogenerador de condensación para cumplir con las metas de producción, manteniendo una alta calidad en el producto o alta eficiencia de operación.

Durante los periodos de Zafra podemos decir que la exigencia de producción del turbogenerador de condensación es regulada, en cambio, durante el periodo de generación, esta incrementa hasta su potencia nominal, también podemos agregar que, por normativa del sistema interconectado nacional, la variación de voltaje de un generador solo puede ser de  $\pm 5\%$ , y la frecuencia de  $\pm 1\%$ . Por otro lado, en el subsistema del turbogenerador de condensación funciona con parámetro físico de presión de vacío o succión de vapor, al salir de la turbina, la presión del vapor es muy baja que este no desciende, por ello un sistema de vacío para extraer ese vapor y ser llevados hacia un condensador.

Para conocer mejor el subsistema se realizó recorrido por todo el subsistema y se elaboró el siguiente diagrama de flujos.

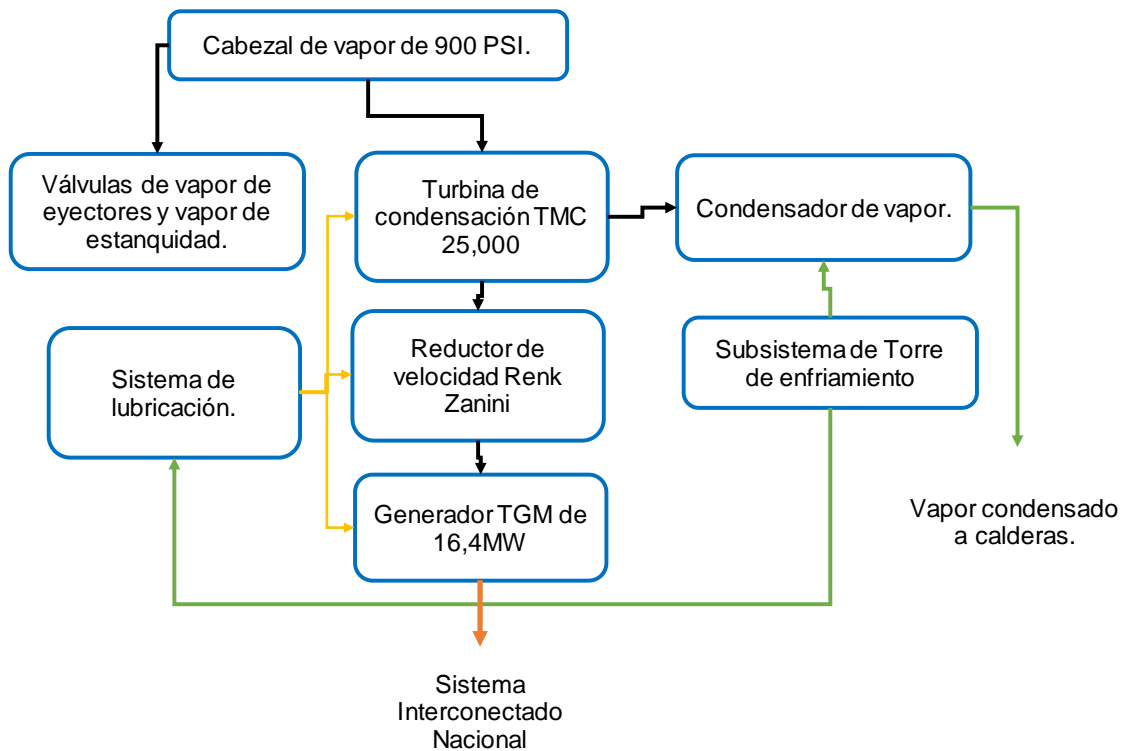


Fig. 7,4. Diagrama de flujos de turbogenerador de condensación de la Planta Eléctrica Monte Rosa, fuente propia.

De estos datos podríamos decir que las funciones principales del subsistema son:

Función Principal	
1	Generar potencia activa en un rango de 12MW a 14.4MW a una frecuencia de 60Hz $\pm 1$ , con un voltaje de línea de 13.8kV $\pm 5\%$ , durante el periodo de zafra, con una presión de vacío de $-0.75\text{kg/cm}^3$
2	Generar potencia activa en un rango de 14.5MW a 16.4MW a una frecuencia de 60Hz $\pm 1$ , con un voltaje de línea de 13.8kV $\pm 5\%$ , durante el periodo de generación con una presión de vacío de $-0.75\text{kg/cm}^3$ .

Tabla 7.3, Funciones principales del subsistema del turbogenerador de condensación.

De la misma forma, los fallos funcionales son todas aquellas formas en las que la función principal no se cumple. Entonces podemos decir que, los fallos funcionales de las funciones principales son:

Fallas funcionales.	
A	Turbogenerador no genera potencia activa.
B	Turbogenerador genera potencia activa por debajo del rango demandado durante el periodo de producción.
C	Frecuencia del turbogenerador se mantiene por encima de los 60Hz.
D	Frecuencia del turbogenerador se mantiene por debajo de los 59Hz.
E	El voltaje del turbogenerador está por encima de los 14.9kV.
F	El voltaje del turbogenerador está por debajo de los 13.11kV.
G	La presión de vacío es $0\text{kg/cm}^3$ .
H	La Presión de vacío es menor de $0.75\text{kg/cm}^3$ .

Tabla 7.4, fallas funcionales de las funciones principales del turbogenerador de condensación.

Si bien estas fueron las razones por las cuales se adquirió el turbogenerador, hay otras funciones que también nos gustaría que cumpliera, unas de confort, otras de calidad, seguridad y protecciones de la misma, a estas funciones se les llama funciones secundarias.

Para poder redactar se realizó un levantamiento de todas aquellas funciones que debería cumplir la maquina según el manual, todas aquellas que desea que

cumpla el responsable del proceso y el operador de la máquina. Estas funciones secundarias y sus fallos asociados son:

Funciones Secundarias		Fallos funcionales.	
1	Proteger al personal de partes móviles.	A	Se presentan condiciones inseguras.
		B	Los operadores no está capacitados para operar la máquina.
		C	Caseta de resguardo no cumple las condiciones.
2	Evitar fugas de vapores peligrosos	A	Presencia de vapores calientes con temperaturas de arriba de los 40°C.
3	Evitar fugas de aceites teresso 68.	A	Sistema de lubricación presenta fugas.
4	Condensar vapor a una tasa de 47,520kg/h sin realizar contaminación cruzada.	A	Se condensa vapor a una tasa menor de 47,520kg/h.
		B	Se mezclan aguas de distintas fuentes.
5	Mantener una presión de aceite por encima de los 60Psi.	A	Sistema de lubricación no levanta presión.
		B	Sistema de lubricación se mantiene por debajo de los 60Psi.
6	Capacidad de regulación de carga eléctrica en el subsistema.	A	Panel de control no regula carga eléctrica del generador.
7	Mantener presión de 4 Psi para sello en buje laberinto.	A	No levanta presión en buje laberinto.
		B	Presión en buje es mayor a 4 Psi para levantar vacío.

8	Protección de velocidad si turbina sube por encima de las 6,000RPM	A	La protección mecánica por sobre velocidad no actúa.
		B	La protección por sobre velocidad eléctrica no actúa.
		C	Sistema de alarma por sobre velocidad no actúa.
9	Proteger turbogenerador si temperatura de chumaceras es mayor de 120°C	A	La protección por alta temperatura no actúa.
		B	Alarma por alta temperatura no actúa.
		C	Valor incorrecto en la medición.
10	Protección de turbogenerador por altas vibraciones.	A	Protección por altas vibraciones no actúa.
		B	Valor incorrecto en la medición.
11	Protección fallas en devanado de generador.	A	Protección no actúa.
		B	Valores de protección sobredimensionados.
12	Apertura de interruptor ante cualquier anomalía.	A	Interruptor no actúa ante las anomalías.

Tabla 7.5. Funciones secundarias y sus fallas funcionales asociadas del subsistema del turbogenerador de condensación, fuente propia.

Del recorrido realizado también se realizó el levantamiento de todos los equipos contenidos en el subsistema, el cual, si uno de ellos llega a fallar, afecta la operación del turbogenerador, parando por completo o limitando la producción, a estos equipos les diremos como “componentes que afectan las funciones en estudio”.

Todos estos equipos se presentan en la siguiente tabla, además de ello se investigó con los operadores, que efecto tendría si el equipo fallase. Algunos de estos componentes son presentados en la sección de anexos gracias a la autorización de la empresa para tener mayores detalles.

Componentes que afecta el sistema en estudio.	
Descripción	Función del componente.
Válvula de admisión	Corta el flujo de vapor proveniente del colector de 900PSI hacia la turbina de condensación
Carrete de vapor	Conecta tubería de vapor de condensación con turbina sin presentar fugas.
Válvula de cierre rápido	Corta el flujo de vapor que ingresa a la turbina ante cualquier fallo o actuación de protecciones de la turbina.
Servomotores	Regulan el flujo de vapor que ingresa a la cámara de la rueda en dependencia de la carga solicitada.
Válvula Hiltter	Suministra vapor de sello en los bujes laberintos
CPC	Convierte la señal de 4-20ma a presión hidráulica.
Turbina	Transforma energía térmica a energía mecánica.
Acople turbina reductor	Transferir potencia mecánica de la turbina al reductor.
Sensor de temperatura	Medición de temperaturas en grados Celsius de las chumaceras y las carcasas.
Sensor de vibraciones	Medición de temperaturas en grados Celsius de las chumaceras y de la turbina, generador y reductor.
Válvula solenoide	Activar válvula de cierre rápido, cuando se cumplan condiciones de arranque.
Reductor	Reducir velocidad de 6000RPM a 1800 RPM desde la turbina al generador.
Generador eléctrico	Convertir energía mecánica en energía eléctrica.

Excitatriz	Suministra corriente directa de 8amp al rotor del generador para crear campo magnético.
Junta flexible	Acoplamiento de conexión para transferencia del vapor de salida de la turbina al generador.
Condensador	Condensar vapor de salida de la turbina a una tasa de 24,000GPM
Bomba de pozos calientes	Bombear agua a razón de 350 GPM, para desalojar el condensado.
Intercondensador	Calentar agua condensada para mejorar la eficiencia de las calderas
Aftercondensador	Calentar agua condensada para mejorar la eficiencia de las calderas
Eyector de marcha	Mantener un sistema de vacío de $-0.85\text{kg/cm}^2$ para condición de marcha de la turbina.
Eyector de arranque	Mantener un sistema de vacío de $-0.75\text{kg/cm}^2$ para condición de arranque de la turbina.
Válvulas de sello de agua	Controlar sistema de eyector en línea.
Válvula automática de vapor de estanquidad	Alimentación de vapor a 220PSI, a sistema de eyectores y vapor de estanquidad.
Válvula automática de vapor de sello	Suministra vapor a válvula Hiltter de sistema de sello.
Calentador de agua condensada	Calentar agua condensada para mejorar la eficiencia de las calderas
Panel eléctrico de generador	Contiene todas las protecciones eléctricas del generador.
Panel eléctrico de turbina	Contiene todas las protecciones mecánicas de la turbina.
Panel de surtos	Contiene las protecciones contra fallas a tierras y transformadores de medición de las turbinas.
Interruptor de potencia	Conexión y desconexión del generador al sistema inter conectado.



Transformador de 20MVA	Elevar voltaje 13.8kV del generador a 69kV.
Seccionadores de 8kA	Apertura mecánica del circuito eléctrico antes del interruptor.
Acometida eléctrica de control de lazos	Transmitir señales de pulsos o corrientes para control del generador.
Motor de giro lento	Suministrar potencia y velocidad de giro para enfriamiento de la turbina.
Reductor de giro lento	Hacer girar la turbina a 300RPM para enfriar la turbina.
Bomba de lubricación principal	Mantener lubricación arriba de los 124PSI cuando la turbina llega a las 6000RPM.
Bomba de lubricación auxiliar	Mantener lubricación arriba de los 124PSI para puesta en marcha de la turbina.
Bomba de lubricación de emergencia	En caso de emergencia mantiene una lubricación de 34PSI para lubricar las chumaceras.
Tanque de aceite	Contener aceite teresso 68 para sistema de lubricación.
Extractor de gases	Extrae valor caliente del tanque para evitar agua condensada.
Extractor de aire	Extrae aire caliente contenido en la caseta de la turbina.
Bomba de achique filtros	Achicar sobrante de aceite a la hora de realizar cambio de filtro.
Filtros de aceite	Capturar partículas dañinas contenidas en el aceite.
Enfriador de aceite	Enfriar aceite saliente del sistema de lubricación del turbogenerador.
Enfriador de aire del generador	Enfriar aire que circula a través del generador para mantener temperaturas de 35°C en el devanado.

Caseta perimetral	Restringir el acceso de personas a las piezas móviles.
Válvulas de purga	Sistema de purga para evitar que ingrese vapor húmedo a la turbina.
Válvulas de extracción	Permite extraer vapor a diferentes presiones para otros usos.

Fig. 7.6, Tabla de componentes contenidos en el subsistema de turbogenerador de condensación, cabe mencionar que estos equipos son mantenibles, fuente propia.

### 7.3 Análisis de modos de fallos, efectos y criticidad. (FMECA).

Para el análisis de modos de fallos vamos a subdividir aún más equipos del turbogenerador de condensación, esto con la finalidad, esto con la finalidad de hacer el análisis de forma más ordenada y entendible. El subsistema lo vamos a dividir en:

- Sistema de suministro de vapor.
- Turbina de vapor.
- Generador eléctrico.
- Panel de control eléctrico.
- Sistema elevador de voltaje.

Ahora a cada equipo también se le definirá una función la cual se desea que se desempeñe, asociado a ello vamos establecer cuál es su modo o mecanismo de fallo asociado (Estos datos se obtendrán de la base de datos de ordenes correctivas que proporciono la empresa para efectos de estudio), por otro lado, también se va a investigar que otras formas posibles tiene el equipo de fallar mediante los manuales de los equipos o investigación de fallos en equipos similares de otras empresas.

También vamos a evaluar la criticidad del modo de fallo calculando el RPN con la ecuación 5.1, como se vio en el capítulo #5.

Para la severidad de los fallos se utilizará la ecuación 5.2 mostrado en el capítulo 5, pero vamos a utilizar los siguientes criterios que serán aplicados a la base de datos para poder realizar el cálculo de cada modo de fallo.

Parametros de la Severidad		
Costo de reparación	3	Mayor a U\$10,000.00
	2	Menor a U\$10,000.00
	1	Menor a U\$3,000.00
Perdidas de producción. (hara referencia al tiempo perdido)	3	Mayor de U\$ 10,000.00
	2	Menor a U\$ 10,000.00
	1	Menor a U\$ 3,000.00
Medio ambiente.	3	Contaminación.
	1	No contamina
Seguridad (afectación a los operadores).	3	Posibilidad de accidente.
	1	No porvoca accidente.

Para poder medir a ocurrencia de los fallos en valores cualitativos, diremos que:

Ocurrencia		
Fallo muy probable.	3	Mayor a 10 veces
Fallo probable.	2	Menor a 10 veces
Fallo muy poco probable.	1	Menor a 2 veces

Fig. 7.4.A. Rango de valores para el parámetro de la ocurrencia de fallos.

Para poder medir la Detectabilidad diremos que:

Detectabilidad		
Indetectable.	3	No se localiza la falla.
Razonablemente detectable.	2	Inspección por rutas especializadas
Seguramente detectable.	1	Inspección con ruta.

Fig.7.4. B. Rango de valores para el parámetro de detectabilidad del fallo.

En el caso de la detectabilidad, diremos que un fallo es detectable si este presenta síntomas antes del fallo, y no necesariamente si da un margen de actuación.

### **Sistema de suministro de vapor.**

Empezando por el subsistema de “sistema de suministro de control”, este está conformado desde una válvula mecánica de admisión en el cabezal de 900PSI hasta las válvulas reguladoras de vapor en la turbina, estas se encargan del suministro de vapor y también del corte del flujo del mismo (imagen de cabezal de vapor mostrada en anexos). Entonces diremos que su función principal es “suministrar vapor de 900psi con temperatura de 930°F” a la turbina”, por ende, su fallo funcional podría describirse como “Sistema no suministra vapor a la turbina”. Si llenamos la hoja de los fallos funcionales y sus efectos quedaría de la siguiente forma.

Equipo	Funciones	Modos de fallas		Efectos.
Sistema de Suministro de vapor.	1 Suministrar vapor de 900Psi a 930°F a la turbina en lazo con la carga demandada, sin presentar fugas.	A	Válvula hidráulica de cierre rápido no abre.	Válvula de cierre rápido no permite el flujo de vapor hacia la turbina, impide que el dispositivo 505 controlador de turbina le dé marcha al equipo.
		B	Válvulas reguladoras de vapor no abren o no abren completamente,	Impiden el paso de vapor hacia la cama de la rueda, no permite a la turbina llegar a plena carga.
		C	Válvula solenoide no libera.	No permite la apertura de la válvula de cierre rápido de la turbina, impidiendo poner en marcha la turbina.
		D	La apertura de las válvulas de regulación no es proporcional a la carga.	No permite a la turbina llegar a plena carga.
		E	Fuga de vapor en válvula de admisión.	Caída de presión en la línea de vapor de admisión, altos niveles de ruidos que son fuentes de peligro para el operador, posibilidad de accidente.

			F	Fuga de vapor en válvula de cierre rápido.	Caída de presión en la línea de vapor de admisión, altos niveles de ruidos que son fuentes de peligro para el operador..
			G	Válvula de sello o vapor de estanquidad no abre.	No realiza sello en los bujes, permitiendo que se escape el vacío, no permite poner en línea el turbogenerador.
	2	Cortar flujo de vapor que ingresa a la turbina.	1	Válvula de admisión no cierra completamente.	No impide el flujo de vapor, manteniendo presurizada la línea de vapor de admisión.
			2	Válvula de cierre rápido no cierra completamente.	No impide el flujo de vapor hacia la turbina manteniendo presurizada la turbina, aumenta la temperatura en servomotores, no permite dejar fuera de línea la máquina.
			3	Servomotores no sella.	Mantienen la cámara de aire con vapor, hace que se forme condensado

Tabla 7.5, Modos de fallos y efectos del sistema de suministro de vapor del turbogenerador, estos fueron obtenidos de historiales de fallos y manuales de los equipos.

Luego utilizaremos la siguiente base de datos proporcionada por el ingenio para cálculo de la criticidad de los modos de fallas en el sistema de suministro de vapor en el turbogenerador.

Modo de falla.	Costo de reparación en U\$.	Ocurrencia	Detectable	Coste de producción en U\$.	Seguridad y medio ambiente.
Fallos en válvula de cierre rápido.	9,000.00	1 en un año.	Es visible el fallo.	38,280.00	No afecta.
Válvulas reguladoras de vapor no abren completamente	9,000.00	1 en un año.	Es visible el fallo.	5,002.00	No afecta.
Válvula solenoide no libera.	350.00	1 en un año.	No es visible el fallo.	2,501.25	No afecta
Apertura de válvula de regulación no es proporcional a la carga.	520.00	20 en un año.	Es visible el fallo.	110,514.00	No afecta.
Fuga de vapor en válvula de cierre rápido.	350	2 en un año.	Es visible el fallo.	42,504.00	No afecta.
Fuga de vapor de admisión	750.00	1 en un año.	Es visible el fallo.	112,125.00	Afecta la seguridad.
Válvula de estanquidad no abre.	340.00	15 en un año.	Es visible el fallo.	1,771.00	No afecta.

Tabla 7.6, Base de datos de fallos en subsistema de suministro de vapor del turbogenerador, suministrada por la Gerencia de fábrica.

Si aplicamos las tablas 7.4 A y 7.4 B a los modos de fallas con esta base de datos, diremos que para el modo de fallo:

- Válvula de cierre rápido no abre.

$$Severidad = \frac{2 \cdot 3 \cdot 1 \cdot 1}{4} = 1.5$$

$IRN = 1.5 \cdot 1 \cdot 1 = 1.5$ , por tanto, no se considera crítico si consideramos la tabla de la figura 5.5 de la matriz de criticidad.

- Válvulas reguladoras de vapor no abren completamente.

$$Severidad = \frac{2 * 2 * 1 * 1}{4} = 1$$

$IRN = 1 * 1 * 1 = 1$ , por tanto, no se considera un modo de fallo crítico.

- Válvula solenoide no libera.

$$Severidad = \frac{1 * 1 * 1 * 1}{4} = 0.25$$

$IRN = 0.25 * 1 * 1 = 0.25$ , por tanto, no se considera un modo de fallo crítico.

- Apertura de la válvula de regulación no es proporcional a la carga.

$$Severidad = \frac{1 * 3 * 1 * 1}{4} = 0.75$$

$IRN = 0.75 * 3 * 1 = 2.25$ , por tanto, no se considera un modo de fallo crítico.

- Fuga de vapor en válvula de admisión.

$$Severidad = \frac{1 * 3 * 1 * 3}{4} = 2.25$$

$IRN = 2.25 * 1 * 1 = 2.25$ , por tanto, no se considera un modo de fallo crítico, para el caso de fugas de vapor en válvula de cierre rápido, presenta las mismas condiciones, por ende, tampoco se considera un modo de fallo crítico.

- Válvula de vapor de sello o estanquidad no abre.

$$Severidad = \frac{1 * 1 * 1 * 1}{4} = 0.25$$

$IRN = 0.25 * 1 * 3 = 0.75$ , por tanto, no se considera un modo de fallo crítico.

- Válvula de admisión no sella completamente.

$$Severidad = \frac{1 * 3 * 1 * 3}{4} = 2.25$$

$IRN = 2.25 * 1 * 1$ , por tanto, no se considera un modo de fallo crítico, de la misma forma se puede decir que los modos de fallas “válvula de cierre rápido no cierra completamente o servomotores no sellan” tampoco se



consideran críticos, ya que a pesar que el costo de reparación es muy alto, este no tiene un impacto que vaya afectar la producción o eficiencia del equipo.

Considerando los modos de fallas, su criticidad quedaría de la siguiente manera.

Modo de fallo	Coste de reparación	Perdida de producción	Seguridad	Medio ambiente	Severidad	Ocurrencia	Detectabilidad	IRN
Válvula hidráulica de cierre rápido no abre.	2	3	1	1	1.5	1	1	1.5
Válvulas reguladoras de vapor no abren o no abren completamente,	2	2	1	1	1	1	1	1
Válvula solenoide no libera.	1	1	1	1	0.25	1	1	0.25
La apertura de las válvulas de regulación no es proporcional a la carga.	1	3	1	1	0.75	3	1	2.25

Fuga de vapor en válvula de admisión.	1	3	1	3	2.25	1	1	2.25
Fuga de vapor en válvula de cierre rápido.	1	3	1	3	2.25	1	1	2.25
Válvula de sello o vapor de estanquidad no abre.	1	3	1	1	0.25	3	1	0.75
Válvula de admisión no cierra completamente.	1	3	1	3	2.25	1	1	2.25
Válvula de cierre rápido no cierra completamente.	1	3	1	1	0.75	1	1	0.75
Servomotores no sella.	1	3	1	1	0.75	1	1	0.75

Tabla 7.7, Criticidad de los modos de fallas del subsistema de "Suministro de vapor", calculadas conforme a bases de datos proporcionados por Monte Rosa S.A

### Sistema de turbina de vapor.

De acuerdo al manual del equipo, la turbina de acción de condensación modelo TMC 25,000 es una turbina compacta, de múltiples etapas, proyectada para atender accionamientos que exigen alto rendimiento, bajo consumo, bajo condiciones de vapor con valores medios de presión y temperatura con una potencia máxima de 16.4MW. Entonces, podemos decir que la función de la turbina de condensación es “Convertir la energía térmica del vapor a energía mecánica con un consumo de vapor de 9 klb/h”. el mismo manual nos dice algunas de las formas en las que esta función no se puede cumplir la cual mostramos en la siguiente tabla.

Equipo	Funciones	Modos de fallas		Efectos.
Turbina de vapor TMC 25,000.	1 Convertir la energía térmica del vapor a energía mecánica con un consumo de vapor de 9 klb/h, transmitiéndola al reductor.	A	Alabe de la turbina con desperfectos.	Provoca desbalance en el rotor de la turbina, alterando los valores de vibraciones, turbina se dispara por altas vibraciones, cae la producción del equipo.
		B	Holguras en chumaceras radiales.	Incrementa la temperatura en los puntos de apoyo, provoca altas vibraciones en el rotor de la turbina, turbina se dispara por altas vibraciones o altas temperaturas, cae la producción.
		C	Alta presión en la cámara de la rueda.	Turbina sale de operación por protección por alta presión o temperatura, cae la producción del equipo.
		D	Holguras en chumaceras axiales.	Provoca un desplazamiento del rotor mayor a +30µm, altas vibraciones en roce

				de alabes, turbina sale de línea por altas vibraciones y por protección de desplazamiento axial.	
			E	Ruptura de acoplamiento.	Provoca altas vibraciones por desbalance del rotor de la turbina, la turbina sale de línea por protección de altas vibraciones, cae producción.
			F	Reductor no transmite potencia mecánica hacia el generador.	Turbina no puede entrar en operación.
			G	Válvula de sello o vapor de estanquidad no abre.	No realiza sello en los bujes, permitiendo que se escape el vacío, no permite poner en línea el turbogenerador.
			H	No hay sello en buje laberinto de sello de vapor.	Provoca fuga de presión de vacío en la turbina, sale de línea por protección de bajo vacío, cae la producción.

Tabla 7.8, Modos de fallas y efectos del subsistema de la turbina de condensación, obtenidos de los manuales suministrado por Monte Rosa S.A e investigados en base de datos de fallos.

De la base de datos suministrados por monte rosa, solamente se lograron encontrar dos fallas en las turbinas, estos se muestran en la tabla 7.9, podemos deducir que esto se debe a que es un equipo de alta confiabilidad y con alta resistencia a los fallos, también se nos comentó que por temas de garantías y gestiones económicas del equipo

siempre que ocurre algo en la turbina se solicita a un técnico especializado de la marca TGM para revisión de la misma, por ello los costos de reparación y costes de producción serán equivalentes a 3.

Modo de falla.	Costo de reparación en U\$.	Ocurrencia.	Detectable.	Coste de producción en U\$.	Seguridad y medio ambiente.
Ruptura en buje de sello de turbina.	45,000.00	1 en un año.	Es visible con ruta de inspección especial.	135,792.00	No afecta.
Desplazamiento axial del rotor de la turbina, mayor a +30µm	25,000.00	1 en un año.	Es visible con ruta de inspección especial.	124,200.00	No afecta.

Tabla 7.8, base de datos de fallos correspondientes a la turbina.

De esta base de datos agregamos que el costo asociado a la reparación, corresponde a la estadía del técnico especializado durante la reparación del equipo. Aplicando de nuevo el método de cálculo del *IRN* que se aplicó en el sistema de suministro de vapor, obtendremos los siguientes resultados de criticidad.

Modo de fallo	Coste de reparación	Perdida de producción	Seguridad	Medio ambiente	Severidad	Ocurrencia	Detectabilidad	IRN
Alabe de turbina con desperfectos.	3	3	1	1	2.25	1	2	4.5
Holguras en chumaceras radiales.	3	3	1	1	2.25	1	1	2.25

Alta presión en cámara de la rueda.	3	3	1	1	2.25	1	1	2.25
Holguras en chumaceras radiales.	3	3	1	1	2.25	1	1	2.25
Ruptura en acoplamiento.	1	3	1	1	0.75	1	1	0.75
Reductor no transmite potencia al generador.	3	3	1	1	2.25	1	1	2.25
Válvula de sello o vapor de estanquidad no abre.	1	3	1	1	0.25	3	1	0.75
No hay sello en buje laberinto.	3	3	1	1	2.25	3	1	6.75

Tabla 7.9, Criticidad de los modos de fallos de turbina TCM 25,000 de turbogenerador de condensación, estos valores fueron en base a datos proporcionados por Monte Rosa.

### Generador Eléctrico.

El sistema de turbogenerador eléctrico cuenta con un generador de tipo de rotor de polo liso, con una potencia de 16.4MW y voltaje de línea de 13.8kV de 4 polos, cuenta con una excitatriz de tipo de diodos estacionarios, esta inyecta corriente al rotor del generador para inducir la FEM; este equipo también es marca TGM y recibe la potencia mecánica transmitida por el reductor. Podemos declarar que la función del generador será “Transformar la energía mecánica a energía eléctrica”, entonces los modos de fallos asociados a esta serian:

Equipo	Funciones	Modos de fallas		Efectos.
Generador Eléctrico de 16.4MW	1 Transformar la energía mecánica a energía eléctrica.	A	Voltaje en la excitatriz es cero.	No circula corriente por el rotor del generador, no realiza proceso de conversión de energías, equipo no se puede poner en línea.
		B	Altas vibraciones en cojinetes.	Altas vibraciones en chumaceras del rotor, equipo sale de fuera de línea por protección contra altas vibraciones, cae la producción del equipo.
		C	Rotor con desbalance.	Altas vibraciones en cuerpo del generador, posibilidad de rose de rotor con núcleo del estator, equipo sale de línea por protección contra altas vibraciones, cae la producción del equipo.
		D	Baja presión de aceite en el generador.	Equipo sale de línea por baja presión de lubricación en las chumaceras.

			E	Cortocircuito en devanado del generador.	Equipo sale de línea por protección, cae la producción del equipo.
			F	Ruptura de acoplamiento.	Provoca altas vibraciones por desbalance del rotor de la turbina, la turbina sale de línea por protección de altas vibraciones, cae producción.
			G	Ruptura en barras de estator.	Turbina no puede entrar en operación.

Tabla 7.10, Modos de fallos asociados a la función principal del generador del sistema de turbogenerador de condensación.

Aplicando el mismo método de cálculo de criticidad de los modos de fallas quedarían de la siguiente manera:

Modo de fallo	Coste de reparación	Perdida de producción	Seguridad	Medio ambiente	Severidad	Ocurrencia	Detectabilidad	IRN
Voltaje es cero en la excitatriz.	2	3	1	1	1.5	1	2	3
Altas vibraciones en los cojinetes.	2	3	1	1	1.5	1	1	3
Rotor con desbalance.	3	3	1	1	2.25	1	1	2.5



Baja presión de aceite en el generador.	1	3	1	1	0.75	1	1	0.75
Cortocircuito en devanado de generador.	3	3	3	1	6.75	1	1	6.75
Ruptura en acoplamiento.	1	3	1	1	0.75	1	1	0.75
Ruptura en barras de estator.	3	3	3	1	2.25	3	1	6.75

Tabla 7.11, Criticidad de los modos de fallas del generador eléctrico de 16.4MW,

### Panel eléctrico de control de la turbina.

El panel de control es donde están contenidas todas las protecciones remotas de la turbina de condensación, todas ellas actúan ante cualquier anomalía para proteger la turbina y el generador. Al mismo tiempo se utiliza para controlar la carga eléctrica del generador mediante la regulación del flujo de vapor que ingresa a la turbina. De ello podemos decir que la función del panel de control de la turbina es “Armar la turbina, controlar la velocidad y la potencia generada con oscilaciones dentro del rango permitido, manteniendo la capacidad de protección de la misma”. Para poder reconocer los modos de fallas en esta ocasión se tuvo que realizar una investigación con eléctrico de la planta eléctrica (persona encargada del mantenimiento de los paneles de control), entonces los modos de fallas quedarían de la siguiente manera:

Equipo	Funciones	Modos de fallas		Efectos.	
Panel de control eléctrico de la turbina.	1	Armar la turbina, controlar la velocidad y la potencia generada con oscilaciones dentro del rango permitido, manteniendo la capacidad de protección de la misma	A	Fallo del convertidor de corriente CPC.	No levanta presión suficiente "P1" para apertura de válvula de cierre rápido y control de servomotores de la turbina, no entra en línea el turbogenerador.
			B	Fallo de gobernador de velocidad 505.	No se puede armar turbina por la falta de protección de sobre velocidad eléctrica, el turbogenerador no entra en línea.
			C	Fallo en equipo de protección 203.	No se puede armar turbina, por falta de protección de sobre velocidad mecánica, turbogenerador no entra en línea.
			D	Válvula solenoide no se energiza.	La válvula de cierre rápido no libera, turbogenerador no entra en operación.
			E	Actuadores de regulación operan de forma irregular.	El turbogenerador no logra llegar a plena carga.
			F	Falsas mediciones de temperaturas o vibraciones.	Turbogenerador no entra en línea o sale de línea por protección contra altas temperaturas o vibraciones en la turbina, turbina esta desprotegida.

Tabla 7.12, Modos de fallos de "panel de control eléctrico de la turbina", obtenidos mediante la experiencia del eléctrico de la planta.

Con respecto a estos modos de fallos, no se encontraron registros algunos. Para poder definirlos se tuvo una conversación con el eléctrico y el jefe de proceso, ellos comentan los fallos por equipos de vigilancia de la turbina (control de turbina 505, y protección de alta velocidad 203) no han tenido alguno. Raras ocasiones tienen fallos en los paneles de control por temas de aperturas de fusibles, contactores que no actúan. Por tanto, los costos de reparación han sido bajos (serán equivalentes a 1), los costes de producción equivalen al tiempo de parada de la máquina, el cual no asciende a más de 3 horas. Las afectaciones al medio ambiente y riesgos a las personas tampoco son graves.

Por tanto, si aplicamos la misma técnica para medir la criticidad de los fallos, quedaría de la siguiente manera:

Modo de fallo	Coste de reparación	Perdida de producción	Seguridad	Medio ambiente	Severidad	Ocurrencia	Detectabilidad	IRN
Fallo del convertidor de corriente CPC.	2	3	1	1	1.5	1	2	3
Fallo de gobernador de velocidad 505.	2	3	1	1	1.5	1	1	3
Fallo en equipo de protección 203.	2	3	1	1	2.25	1	1	2.5
Válvula solenoide no se energiza.	1	3	1	1	0.75	1	1	0.75

Actuadores de regulación operan de forma irregular.	2	3	1	1	1.5	2	1	3
Falsas mediciones de temperaturas o vibraciones.	1	3	1	1	0.75	1	1	0.75

Tabla 7.13, Criticidad de los modos de fallos presentados en el panel eléctrico.

### Transformador de potencia.

El sistema elevador de voltaje, no es más que un transformador conectado en serie al generador, con el fin de elevar los 13.8kV a 69kV para inyectar potencia al Sistema Interconectado Nacional reduciendo las pérdidas por resistencia del conductor. Este sistema está compuesto por un transformado de 20MW y un interruptor de potencia de tipo compacto con extintor de arco mediante gas SF6. Entonces diremos que la función de este componente es “Elevar el voltaje de salida del generador a 69 KV para sincronizar con la barra de 69 KV de Monte Rosa, con una temperatura máxima de 90 C, y una presión de nitrógeno”

De acuerdo al manual y al historial de fallos que se han tenido, los modos de fallos de esta función son:

Equipo	Funciones		Modos de fallas		Efectos.
Transformador Eléctrico.	1	Elevar el voltaje de salida del generador a 69 KV para sincronizar con la	A	Devanado con daños por falla a tierra.	Turbogenerador no se puede sincronizar al sistema.
			B	Transformador queda fuera de línea por diferencial de corriente.	Turbogenerador eléctrico queda fuera de línea, no se puede sincronizar al sistema, cae la producción.

	barra de 69 KV de Monte Rosa, con una temperatura máxima de 90 C, y una presión de nitrógeno positiva, conectando con un interruptor de 69 KV, con gas SF6, y presión de 5 PSI	C	Baja presión de nitrógeno.	No permite sincronizar el turbogenerador al sistema, turbogenerador queda fuera de línea, cae la producción de la máquina.
		D	Alta temperatura en los devanados.	Turbogenerador sale de línea por protección, no permite la sincronización a la red, cae la producción.
		E	Actuadores de regulación operan de forma irregular.	El turbogenerador no logra llegar a plena carga.
		F	Interruptor no actúa.	No permite sincronizar la unidad generadora, no permite dejar fuera de línea la unidad generadora.

Tabla 7.14, Modos de falla del sistema elevador de voltaje, obtenidos de bases de datos y experiencia del eléctrico del área.

De la base de datos obtuvieron los siguientes eventos referentes a este componente:

Modo de falla.	Costo de reparación en U\$.	Ocurrencia.	Detectable.	Coste de producción en U\$.	Seguridad y medio ambiente.
Válvula liberadora de presión no actúa.	12,000.00	2 en un año.	No es visible.	45,264.00	No afecta.
Fuga de aceite en transformador	3,000.00	3 en un año.	Es visible el fallo.	0.00	No afecta.

Fuga de gas SF6 en interruptor	6,000.00	365 en un año.	Es visible el fallo.	2,501.25	No afecta
Daño en sensor de densidad SF6.	6,000.00	2 en un año.	No es visible el fallo.	135,792.00	Afecta a la seguridad.

Tabla 7.15, base de datos de fallos ocurridos en sistema de elevación de voltaje, datos suministrados por Monte Rosa S.A

Se aplicamos de nuevo las mismas ecuaciones de cálculo del nivel de criticidad de estos modos de fallos, quedaría de la siguiente forma:

Modo de fallo	Coste de reparación	Perdida de producción	Seguridad	Medio ambiente	Severidad	Ocurrencia	Detectabilidad	IRN
Devanado con daños por falla a tierra.	3	3	1	1	1.5	1	2	3
Transformador queda fuera de línea por diferencial de corriente.	2	3	1	1	1.5	1	1	1.5
Baja presión de nitrógeno.	1	3	1	1	0.75	1	1	0.75

Alta temperatura en los devanados.	3	3	1	1	1.5	1	1	1.5
Interruptor no actúa.	3	3	1	3	3	3	1	27

Tabla 7.16, Criticidad de los modos de fallos en el sistema de elevación de voltaje, calculados con la base de datos suministrada para efectos de estudio por Monte Rosa.

#### 7.4 Causas de fallos, de los modos de fallos.

Una vez identificados todos los modos de fallos de cada subsistema del turbogenerador de condensación. Se procede a identificar cuáles son los posibles mecanismos de fallos, para los fallos que no son considerados como críticos, se identificara el modo de fallo a partir de la solución descrita en la base de datos, para el caso de todos aquellos modos de fallos considerados como críticos o en caso especial que lo requieran, se utilizara una herramienta conocida como árbol de fallas.

Para el caso de los modos de fallos no críticos, se investigó con los mecánicos y eléctricos del área, lo cual encontramos que los mecanismos de fallas de estos modos de fallas (causas) son los siguientes.

Para las causas de fallos vamos a definir tres características importantes que las van a clasificar.

- 1- Si el fallo es infantil, aleatorio o por edad, de acuerdo al manual de Gestión Estratégica de Mantenimiento, el periodo de vida de un equipo un comportamiento a los fallos llamados “curva de la bañera”, la cual describe que todos aquellos fallos que ocurren cuando el equipo empieza su periodo de operación se denominan “infantil”, una vez que el equipo ya paso su periodo de prueba, los fallos se denominan “aleatorio”, luego de

años de operación, llega el periodo de cumplimiento de vida útil, todos los fallos ocurren por el desgaste o “la edad del equipo.

- 2- La segunda característica que usaremos es, si el fallo es “Evidente u Oculto”. Diremos que todo fallo es evidente cuando se puede detectar por simple ruta de inspección, mediciones de parámetros o parada de la máquina; para los modos de fallos ocultos, estos se refieren a todos aquellos fallos que están ahí, pero no pueden ser medidos o detectados hasta que una función del componente es demandada.
- 3- La última característica es “Gradual o Súbito” y refiere a si el modo de fallo con lentitud hasta llegar al punto que el equipo no pueda operar, o por el contrario si inmediatamente ocurrido el fallo el equipo no puede seguir operando.

### Sistema de suministro de vapor.

De acuerdo con el mecánico especialista de la planta eléctrica, las causas de los fallos de los modos de fallos son los siguientes:

Modo de fallo.	Causa del fallo.		Infantil /Aleatorio /Evidente.	Oculto/Evidente	Gradual/Súbito.
Válvula hidráulica de cierre rápido no abre.	A	Acumulación de sales en galleta de sello de válvula.	Aleatorio.	Oculto	Gradual
	B	Fuga de aceite en mecanismo accionado.	Aleatorio	Evidente	Gradual
	A	Desajuste de la CPC	Aleatorio.	Oculto	Gradual



Válvulas reguladoras de vapor no abren o no abren.	B	Desajuste mecánico de las válvulas reguladoras.	Infantil	Oculto	Súbito
	C	Fugas de aceite en accionador	Aleatorio	Evidente	Gradual
	D	Acumulación de sales.	Aleatorio	Oculto	Gradual
Válvula solenoide no libera.	A	Fusible en mal estado.	Aleatorio	Oculto	Súbito
	B	Solenoide quemada.	Aleatorio	Oculto	Súbito
	C	Cable de control roto.	Aleatorio	Oculto	Súbito
La apertura de las válvulas de regulación no es proporcional a la carga.	A	Fatiga de muelles cilíndricos.	Aleatorio	Oculto	Súbito
	B	Desajuste de la CPC	Aleatorio	Oculto	Súbito
	D	Desajuste mecánico	Infantil	Oculto	Súbito.
Fuga de vapor en válvula de admisión.	A	Ruptura de empaque de prensa estopa.	Edad	Evidente	Súbito
Fuga de vapor en válvula de cierre rápido.	A	Apriete incorrecto en junta de la válvula.	Infantil	Evidente	Gradual
Válvula de sello o vapor de estanquidad no abre.	A	Caída de presión neumática	Aleatorio	Evidente	Súbito
	B	Vida útil del componente	Edad	Evidente	Gradual
	C	Perdida de señal de la válvula	Aleatorio	Evidente	Súbito

Válvula de admisión no cierra completamente.	A	Desgaste en la galleta de sello	Edad	Evidente	Gradual
	B	Acumulación de sales en la galleta	Aleatorio	Evidente	Gradual
	C	Ruptura del vástago de la válvula	Aleatorio	Evidente	Gradual
Válvula de cierre rápido no cierra completamente.	A	Baja presión de aceite de la P1	Aleatorio	Evidente	Gradual
Servomotores no sella.	A	Acumulación de sales en buje de sello.	Aleatorio	Oculto	Gradual

Tabla 7.18, Causas de fallos de los modos de fallos del sistema de suministro de vapor, datos obtenidos de las encuestas de las ordenes de trabajos que realizan los trabajadores en Monte Rosa.

### **Turbina de vapor TMC 25,000**

Para el caso de la turbina de condensación, se tuvo la oportunidad de hablar con el técnico especializado de parte de TGM Paulo Zaratini de Brasil. Todos los años que se realiza actividad de revisión de turbina o calibración de equipos de la misma, la empresa contacta con la compañía proveedor. Con la ayuda del técnico y el manual de operación de la turbina, se pudieron determinar las siguientes causas de los modos de fallos:

Modo de fallo.	Causa del fallo.	Infantil /Aleatorio /Evidente.	Oculto/Evidente	Gradual/Súbito.	
Alabe de la turbina con desperfectos.	A	Altas vibraciones en las chumaceras del rotor de la turbina.	Aleatorio.	Evidente	Gradual
	B	Acumulación de óxido en los alabes del rotor.	Aleatorio	Oculto	Gradual
	C	Material defectuoso.	Infantil	Oculto	Gradual
	D	Alta temperatura del vapor.	Aleatorio	Oculto	Gradual
Holguras en chumaceras radiales.	A	Baja presión de lubricación.	Aleatorio	Evidente	Gradual
	B	Falta de aceite en el tanque	Infantil	Evidente	Gradual
	C	Desbalance del rotor.	Aleatorio	Oculto	Gradual
	D	Alta temperatura en aceite de lubricación.	Aleatorio	Evidente	Gradual
Alta presión en la cámara de la rueda.	A	Incrustaciones de depósitos de sales en la turbina.	Aleatorio	Oculto	Gradual
Holguras en chumaceras axiales.	A	Desafinamiento del rotor.	Aleatorio.	Evidente	Gradual
	B	Arrastre de agua en el vapor.	Aleatorio	Evidente	Gradual

Ruptura de acoplamiento.	A	Fatiga de material.	Edad	Oculto	Gradual
Reductor no transmite potencia mecánica hacia el generador.	A	Des alineamiento.	Infantil	Evidente	Gradual
	B	Holguras de cojinetes fuera de los rangos nominales.	Infantil	Evidente	Gradual
Válvula de sello o vapor de estanquidad no abre.	A	Baja presión de aire en la válvula.	Aleatorio	Evidente	Gradual
	B	Daño en acometida de señal de control	Edad	Oculto	Gradual
	C	Válvula des calibrada.	Infantil	Oculto	Gradual
No hay sello en buje laberinto de sello de vapor.	A	Desgaste en carcaza.	Aleatorio	Oculto	Gradual
	B	Válvula hiltter des calibrada	Aleatorio	Oculto	Gradual

Tabla 7.19, Causas de los fallos de los modos de fallos de la turbina de vapor, obtenida mediante la investigación de manuales y ayuda del técnico TGM.

### **Causas de fallos de Generador eléctrico.**

Para el caso de análisis de los modos de fallos del generador eléctrico, Monte Rosa nos proporcionó los informes realizados por la compañía IONS S.A, empresa extranjera que también es contratada por Monte Rosa para el

mantenimiento de los generadores, Con la ayuda del jefe de proceso y los informes se llegó a la conclusión que las causas de fallos son:

Modo de fallo.		Causa del fallo.	Infantil /Aleatorio /Evidente.	Oculto/Evidente	Gradual/Súbito.
Voltaje en la excitatriz es cero.	A	Ruptura de diodo semiconductor de puente rectificador dañado.	Aleatorio	Evidente	Súbito
	B	Cableado de la excitatriz en mal estado.	Edad	Evidente	Súbito
	C	Regulador de voltaje con daños en rectificador.	Aleatorio	Evidente	Gradual
	D	Parámetros de regulador de voltaje están fuera de rango.	Infantil	Oculto	Súbito
Altas vibraciones en cojinetes.	A	Des alineamiento del rotor.	Aleatorio	Oculto	Gradual
Rotor con desbalance.	A	Flojedad en cuñas internas en barras del rotor.	Aleatorio	Oculto	Gradual
Baja presión de aceite en el generador.	A	Filtro sucio de aceite	Aleatorio	Evidente	Gradual
	B	Válvula de flujo de aceite a las chumaceras no opera.	Aleatorio	Evidente	Gradual
	A	Bajo aislamiento en devanado de estator.	Edad	Oculto	Gradual

Cortocircuito en devanado del generador.	B	Ruptura de en tubos de enfriador de aire.	Aleatorio	Oculto	Gradual
--	---	---	-----------	--------	---------

Tabla 7.20, Causa de los modos de fallos en el generador eléctrico, se determinaron con la ayuda del jefe de proceso.

### Causas de modos de fallos del Panel de control.

Para determinar los modos de fallos del panel de control basta con ver los componentes de vigilancia, los fallos asociados al componente hacen referencia a la siguiente pregunta ¿Qué pasa si X equipo de monitoreo no opera? ¿Cómo puede fallar? De estas preguntas se pudieron obtener los siguientes modos de fallos.

Modo de fallo.		Causa del fallo.	Infantil /Aleatorio /Evidente.	Oculto/Evidente	Gradual/Súbito.
Fallo del convertidor de corriente CPC.	A	Contaminación por lubricantes.	Aleatorio	Evidente	Gradual
	B	Vida útil del componente.	Edad	Evidente	Gradual
Fallo de gobernador de velocidad 505.	A	Configuración de parámetros fuera de rangos.	Infantil	Oculto	Súbito
	B	Vida útil del componente.	Edad	Evidente	Súbito
Fallo en equipo de protección 203.	A	Configuración de parámetros fuera de rangos.	Infantil	Oculto	Súbito
	B	Vida útil del componente.	Edad	Evidente	Súbito

Válvula solenoide no se energiza.	A	Bobina de solenoide quemada.	Aleatorio	Oculto	Súbito
	B	Secuencia de disparo no está completa.	Aleatorio	Evidente	Súbito
Falsas mediciones de temperaturas o vibraciones.	A	Tipo de sensor incorrecto	Infantil	Oculto	Súbito
	B	Vida útil del componente	Edad	Evidente	Gradual

Tabla 7.21, Causa de los modos de fallos del panel de control, todos estos fallos inciden en el funcionamiento del turbogenerador de condensación, fueron determinados con ayuda del eléctrico del área.

### Sistema elevador de voltaje.

Modo de fallo.		Causa del fallo.	Infantil /Aleatorio /Evidente.	Oculto/Evidente	Gradual/Súbito.
Devanado con daños por falla a tierra.	A	Bajo aislamiento de devanado de transformador.	Aleatorio	Evidente	Súbito
	B	Perdida de aditamentos en aceite de transformador.	Edad	Oculto	Gradual
Transformador queda fuera de línea por	A	Desbalance de cargas en los ambos devanados.	Aleatorio	Evidente	Gradual

diferencial de corriente.					
Baja presión de nitrógeno.	A	Fuga de gas en juntas de cuba del transformador.	Aleatorio	Oculto	Gradual
	B	Manómetro de presión dañado	Aleatorio	Oculto	Gradual
Alta temperatura en los devanados.	A	Flojedad en puntos de conexión.	Aleatorio	Oculto	Gradual
	B	Ventiladores de enfriamiento en fallos.	Aleatorio	Evidente	Súbito
	C	Perdida de aditamentos de aceite	Edad	Oculto	Gradual
Interruptor no actúa.	A	Baja presión de SF6	Aleatorio	Evidente	Gradual
	B	Mala medición en manómetro.	Edad	Oculto	Gradual
	C	Fallo en medidor de densidad de SF6	Aleatorio	Oculto	Gradual
	D	Líneas de control defectuosas.	Aleatorio	Oculto	Gradual

Tabla 7.20, Causa de los modos de fallos del sistema de elevación de voltaje del turbogenerador de condensación, las causas de fallos fueron investigados de la base de datos de órdenes de trabajos suministrada por Monte Rosa.



## **7.5 Determinación de las tareas de mantenimiento optimas acorde al árbol lógico de decisión aplicado al proceso.**

Con la ayuda del diagrama de decisión mostrado en la figura 6.1 se procederá a evaluar las hipótesis de aplicación de cada tipo de estrategia de mantenimiento priorizando el mantenimiento condicional (basado en síntomas del fallo) por encima de tareas periódicas y por ultimo tareas correctivas. Para aquellos modos de fallos que no pueden tolerarse consecuencias, pero así mismo no se logra determinar la aplicabilidad de alguna de las anteriores estrategias, se recomienda el rediseño. Cabe recalcar que debido a que se trata de un proceso sumamente influenciado por los procedimientos operativos y en el que existe una alta recurrencia de tareas de cambio consumibles, se considera altamente influenciado por la acción humana. Debido a esto, el árbol de decisión aplicado acá, incorpora la evaluación de la aplicabilidad de una “tarea de eliminación de la causa de fallo”, que se refiere a tareas con esfuerzo de implementación relativamente bajos y que están dirigidos a eliminar algunas causas de fallo.

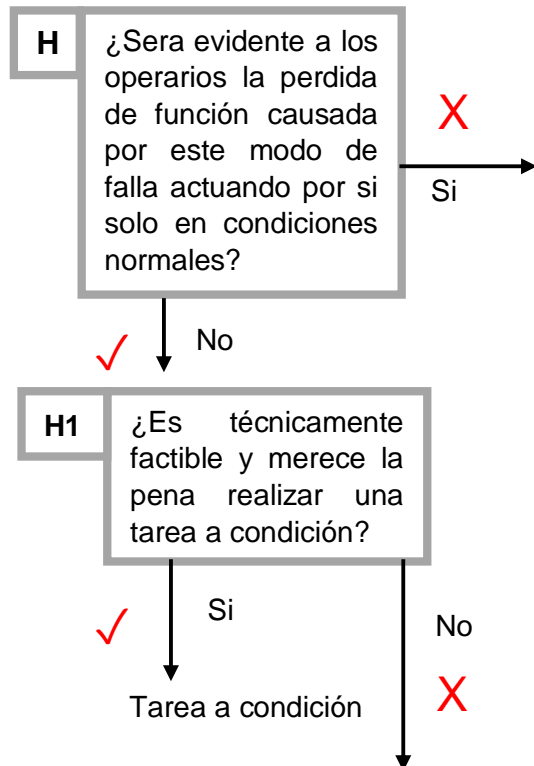
Para este paso aplicaremos el procedimiento descrito en el capítulo #6, con la ayuda del árbol de decisiones se implementará la tarea más costo eficaz para mitigar o erradicar el fallo. Cabe mencionar que durante este proceso se contó con la ayuda del coordinador del proceso, el especialista mecánico del área y el eléctrico de área.

## Estrategias de mantenimiento de Sistema de suministro de vapor.

Empezando por la primera causa de fallo, el árbol de decisión tomaría la siguiente ruta:

Causa de fallo: Acumulación de sales en galleta de sello de válvula de cierre rápido.

Ruta:



Respuestas.

H: No es evidente, ya que este es un componente interno de la válvula de cierre rápido, el cual no puede ser abierto por la presencia de vapor a altas presiones; cuando la falla ocurra, el operador no podrá notarlo y no hay forma de medirlo.

H1: Existe tareas para evitar la creación de sales, como por ejemplo tratamientos químicos del vapor, actividades para eliminar las acumulaciones entre otras.

Si aplicando este mismo método a todas causas de fallos, el resultado será a como se muestra en las tablas siguientes.

Fig. 7.5, Ruta de diagrama de decisiones de causa de fallo “acumulación de sales en galleta de sello de válvula de cierre rápido en sistema de suministro de vapor.

Sistema de suministro de vapor	Evaluación de consecuencias				H1	H2	H3	Método de inspección primario.	Acción de control	Tipo de estrategia	Frecuencia	Responsable
	S1	S2	S3	O1	O2	O3	N1					
Causa de fallo	H	S	E	O								
Acumulación de sales en válvula de cierre rápido.	N				S			Rutina de desplazamiento de válvula.	Mantenimiento general de válvula de cierre rápido.	Mantenimiento basado en condiciones.	Anual	Emilio Nieto
Fuga de aceite en mecanismo accionado.	S	N	S		S			Ruta de inspección crítica.	Mantenimiento general de válvula de cierre rápido.	Tarea basada en basado en condiciones	Anual	Emilio Nieto
Desajuste de la CPC	N	N	S		N	S		N/A	Calibración de equipo.	Tarea de reacondicionamiento	Cada 3 años.	Milton Oconor
Desajuste mecánico de válvulas reguladoras	N	N	N	S	S			Ruta de inspección crítica	Calibración de servomotores	Tarea basada en condiciones.	Anual	Emilio Nieto
Fuga de aceite en accionador	S	N	S		S			Ruta de inspección	Mantenimiento general de servomotores	Tarea basada en condiciones	Anual	Emilio Nieto
Acumulación de sales.	N				S			Comprobación de acción de las válvulas.	Registro de tratamiento de agua calderas.	Tarea basada en condiciones	Diario	Operador de planta DM
Fusible en mal estado	N				N	N	N	N/A	Stock de fusible en bodegas.	Correctiva	Anual	Enrique Palacio
Solenoide quemada	N				N	N	N	N/A	Stock en bodega	Correctiva	Anual	Enrique Palacio
Cable de control roto	N				N	N	N	N/A	Inspección de cableado y aislamiento.	Tarea basada en condiciones	Anual	Enrique Palacios
Fatiga de muelles cilíndricos	N				S			N/A	Mantenimiento de servomotores.	Tarea basada en condiciones	Anual	Emilio Nieto
Desajuste de la CPC	N	N	S		N	S		N/A	Calibración de equipo.	Tarea de reacondicionamiento	Anual	Milton Oconor

Ruptura de empaque en prensa estopa	S	S			S			Inspección audio-visual	Verificación de juntas conforme a procedimiento.	Tarea basada en condiciones.	Anual	Milton Oconor
Apriete incorrecto en junta de la válvula.	S				S			Inspección audio Visual	Verificación de junta conforme a procedimiento, stock en bodega.	Tarea de condiciones.	Anual	Emilio Nieto
Caída de presión neumática	S				S			Inspección visual	Mantenimiento de compresores	Tarea de condiciones	Anual	Proceso de instrumentación
Vida útil del componente	N				S			N/A	Stock de repuestos en bodega	Tarea de condiciones	Anual	Proceso de instrumentación
Perdida de señal de la válvula.	S				S			N/A	Inspección y medición de aislamiento de línea	Tarea de condiciones	Anual	Proceso de instrumentación
Desgaste en la galleta de sello.	N				S			N/A	Mantenimiento general de válvula	Tarea de condiciones	Anual	Emilio Nieto
Acumulación de sales en la galleta de sello	N				S			N/A	Mantenimiento general de válvula	Tarea de condiciones	Anual	Emilio Nieto
Ruptura de vástago de la válvula	S	S			S			Inspección visual	Stock de barras de acero SAE1045	Tarea de condiciones	Anual	Milton Oconor
Acumulación de sales en vástago de la válvula de cierre rápido.	S	N	S		S			Inspección visual	Mantenimiento general de válvula	Tarea de condiciones	Anual	Emilio Nieto
Acumulación de sales en vástago de la válvula de servomotores.	S	N	S		S			Inspección visual	Mantenimiento general de válvulas	Tarea de condiciones	Anual	Emilio Nieto

Tabla 7.21, Tareas de mantenimiento para eliminar o mitigar todos los modos de fallos del sistema de suministro de vapor, obtenidas mediante la aplicación del árbol de decisiones.

Turbina de vapor TMV 25,000	Evaluación de consecuencias				H1	H2	H3	Método de inspección primario.	Acción de control	Tipo de estrategia	Frecuencia	Responsable
	S1	S2	S3	O1	O2	O3	N1					
Causa de fallo	H	S	E	O								
Altas vibraciones en chumaceras de rotor de la turbina	S				S			Ruta de vibraciones	Servicios de mantenimiento de TGM, mediciones de turbina	Tarea basada en condiciones	Anual	Milton Oconor
Acumulación de óxidos en alabes de rotor	S	N	S		S			Registro de tratamiento de agua	Preservación de turbina cuando para producción.	Tarea basada en condiciones	Anual	Milton Oconor
Material defectuoso	N	S			N	N	N	N/A	Servicio de puesta en marcha de turbina	Tarea de búsqueda de fallas.	Anual	Milton Oconor
Altas temperaturas del vapor	S				S			Rutas de inspección.	Control de parámetros de operación de vapor	Tarea basada en condiciones	Diario	Operador de control calderas
Baja presión de lubricación	S	N	S		S			Ruta de inspección	Cambio de juntas en líneas de lubricación	Tarea basada en condiciones	Anual	Emilio Nieto
Falta de aceite en el tanque	S	S			S			Inspección visual	Verificación de nivel de tanque y relleno de aceite antes de iniciar periodo de producción	Tarea basada en condiciones	Anual	Emilio Nieto
Desbalance de rotor	S	S			S			Registro de parámetros de operación	Servicio de puesta en marcha TGM	Tarea basada en condiciones	Anual	Milton Oconor

Alta temperatura de aceite de lubricación	S	N	S		S			Registro de parámetros de operación	Lavado de enfriadores de aceite, , cambio de enfriador de aceite cada 3 meses	Tarea basada en condiciones	Trimestral	Emilio Nieto
Incrustaciones de sales en cámara de la primera rueda	N				S			Registro de parámetros de operación, registro de tratamiento de agua.	Servicios de mantenimiento TGM	Tarea basada en condiciones.	Anual	Milton Oconor
Desafinamiento del rotor	N				S			Registro de parámetros de operación	Servicios de mantenimiento TGM	Tarea basada en condiciones	Anual	Milton Oconor
Arrastre de agua en el vapor	N				S			Registro de parámetros de operación	Verificación de estado de purgas.	Tarea basada en condiciones	Anual	Milton Oconor
Fatiga del material	N				S			N/A	Servicios de inspección TGM	Tarea basada en condiciones	Cada 5 años	Milton Oconor.
Desalineamiento	S	S			S			Registro de parámetros de operación	Servicios de mantenimiento TGM	Tarea basada en condiciones	Anual	Milton Oconor
Holguras en cojinetes de reductor	N	S			S			Registro de parámetros de operación	Servicios de mantenimiento Renk Zanini	Tarea basada en condiciones	Anual	Milton Oconor
Baja presión en válvula de aire	N				S			Inspección visual	Mantenimiento de compresores de aire	Tarea basada en condiciones	Anual	Proceso de Instrumentación
Daño en acometida de señal de operación	N				S			N/A	Medición de aislamiento	Tarea basada en condiciones	Anual	Proceso de instrumentación
Válvula des calibrada	N				S			N/A	Calibración de válvulas automáticas	Tarea basada en condiciones	Anual	Proceso de instrumentación

Desgaste en la carcaza	N				S			N/A	Servicios de mantenimiento TGM	Tarea basada en condiciones	Anual	Milton Oconor
Válvula Hiltter des calibrada	N				S			N/A	Calibración de válvulas automáticas	Tarea basada en condiciones	Anual	Proceso de instrumentación

Tabla 7.22, Tareas de mantenimiento para mitigar o eliminar los modos de fallos en la turbina de vapor, obtenidas mediante la aplicación del árbol de decisiones

Generador eléctrico de 16.4MW	Evaluación de consecuencias				H1	H2	H3	Método de inspección primario.	Acción de control	Tipo de estrategia	Frecuencia	Responsable
	H	S	E	O	S1	S2	S3					
Causa de fallo	H	S	E	O	O1	O2	O3	N1	N2	N3		
Ruptura de diodo semiconductor	N				S			N/A	Mantenimiento de excitatriz y mediciones de puente rectificador	Tarea basada en condiciones	Anual	Enrique Palacios
Cableado de la excitatriz en mal estado	N				S			N/A	Medición de aislamiento de línea	Tarea basada en condiciones	Anual	Enrique Palacios
Regulador de voltaje con daños en rectificador	N				S			Parámetros de operación generadores	Stock de repuesto en bodega	Tarea basada en condiciones	Anual	Enrique Palacios
Parámetros de regulador de voltaje fuera de rangos	N				S			N/A	Comprobación de parámetros y pruebas de AVR	Tarea basada en condiciones	Anual	Milton Oconor
Des alineamiento de rotor	S	S			S			Ruta de vibraciones	Servicios de mantenimiento TGM	Tarea basada en condiciones	Anual	Milton Oconor
Flojedad en cuñas de rotor	N				S			Ruta de vibraciones	Limpieza y revisión de cuñas en rotor	Tarea basada en condiciones	Anual	Enrique Palacios

Filtro de aceite sucio	S	N	S		S			Parámetros de operación	Limpieza de filtro cuando la presión baje hasta 110Psi.	Tarea basada en condiciones	Anual	Operadores de turbinas
Válvula de aceite a chumaceras no opera	N	N	S		S			N/A	Stock de repuesto en bodegas	Tarea basada en condiciones	Anual	Operador de turbinas
Bajo aislamiento del devanado del rotor	N	S			S			N/A	Medición de aislamiento en devanados	Tarea basada en condiciones	Anual	Enrique Palacios
Ruptura de turbos de enfriador de aire	N	S			S			N/A	Inspección y prueba hidrostática en cámara de aire	Tarea basada en condiciones	Anual	Enrique Palacios

Tabla 7.23, Tareas de mantenimiento para mitigar o eliminar los modos de falla en el generador eléctrico, obtenidas mediante la aplicación del árbol de decisiones.

Panel de control eléctrico	Evaluación de consecuencias				H1	H2	H3	Método de inspección primario.	Acción de control	Tipo de estrategia	Frecuencia	Responsable
	H	S	E	O	S1	S2	S3					
Causa de fallo	H	S	E	O	O1	O2	O3					
Contaminación por lubricantes	N				S			N/A	Mantenimiento de CPC	Tarea basada en condiciones	Anual	Enrique Palacios
Vida útil del componente	N				S			N/A	Stock de repuestos en bodega	Tarea basada en condiciones	Anual	Milton Oconor
Configuración de parámetros fuera de rangos	N				S			N/A	Calibración de parámetros y pruebas de servomotores	Tarea basada en condiciones	Anual	Milton Oconor
Vida útil del componente	N				S			N/A	Stock de repuestos en bodega	Tarea basada en condiciones	Anual	Milton Oconor
Bobina de solenoide quemada	N				S			N/A	Stock de repuestos en bodegas	Tarea basada en condiciones	Anual	Milton Oconor



Secuencia de disparo no se cumple	S	N	N	S	S			Inspección visual	Pruebas de parámetros de secuencia de disparos, stock de contactores de control	Tarea basada en condiciones	Anual	Enrique Palacios
Falsas mediciones de temperaturas de o vibraciones	S	N	N	S	S			Inspección visual	Confirmación del correcto tipo de sensor.	Tarea basada en condiciones	Anual	Enrique palacios
Vida útil del componente	N				S			P	Stock de repuestos en bodegas	Tarea basada en condiciones	Anual	Proceso de instrumentación

Tabla 7.24, Tareas de mantenimiento para mitigar o eliminar los modos de fallas del panel de control eléctrico, obtenidos mediante la aplicación del diagrama de decisiones.

Sistema de elevación de voltaje.	Evaluación de consecuencias				H1	H2	H3	Método de inspección primario.	Acción de control	Tipo de estrategia	Frecuencia	Responsable
	H	S	E	O	S1	S2	S3					
Causa de fallo					O1	O2	O3					
Bajo aislamiento del devanado del transformador	N				S			N/A	Medición de aislamiento del transformador	Tarea basada en condiciones	Anual	Enrique Palacios
Perdida de aditamentos del aceite dieléctrico	N				S			N/A	Análisis de calidad del aceite dieléctrico	Tarea basada en condiciones	Anual	Milton Oconor
Desbalance de cargas en ambos devanados del transformador	S	S			S			Medición en línea	N/A	N/A	N/A	N/A
Fugas de gas en juntas de cuba del transformador	N				S			Inspección visual	Servicios de mantenimiento de Enatrel	Tarea basada en condiciones	Anual	Milton Oconor

Flojedad en puntos de conexión.	N				N			N/A	Reapriete de pernos de conexión	Tarea basada en condiciones	Anual	Enrique Palacios
Ventiladores de enfriamiento en fallo	S	N	N	S	S			Inspección visual	Mantenimiento de ventiladores	Tarea basada en condiciones	Anual	Enrique Palacios
Perdida de aditamentos del aceite dieléctrico	N				S			N/A	Análisis de calidad del aceite dieléctrico	Tarea basada en condiciones	Anual	Milton Oconor
Baja presión de SF6	N				S			Inspección visual	Recarga de gas SF6	Tarea basada en condiciones	Anual	Enrique Palacios y Emilio Nieto
Mala medición de manómetro	N	S			S			N/A	Revisión de estado de manómetros	Tarea basada en condiciones	Anual	Enrique Palacios
Falla en medidor de densidad de SF6	N	S			S			N/A	Revisión de contactos de medidor	Tarea basada en condiciones	Anual	Enrique Palacios
Líneas de control defectuosas	N	S			S			N/A	Medición de aislamiento de líneas de control	Tarea basada en condiciones.	Anual	Enrique Palacios

Tabla 7.25, Tareas de mantenimiento para mitigar o eliminar los modos de fallos del sistema elevador de voltaje.

## Conclusiones

Se logra definir el contexto operacional de la planta eléctrica Mote Rosa y al mismo tiempo el contexto operativo gracias a la ayuda del coordinador de proceso y la ficha técnica; la definición de ambos se realizó en base a la meta de producción de energías. Por otra parte, el Ingenio Mote Rosa nos proporcionó una base de datos de órdenes de trabajo que se realizan en la planta eléctrica, con la ayuda de esa base se realizó un análisis de alto nivel de criticidad dando como resultado, una oportunidad de aplicación del análisis de RCM, sin duda gracias a ello, logramos descubrir que el sistema del turbogenerador de condensación es la unidad con mayor cantidad de paros de producción por fallas durante de la operación.

Realizando recorridos en el sistema del turbogenerador, se logró identificar el flujo de energías, de esta forma se pudo plantear un diagrama de flujos del mismo para lograr entender la operación; también se logró definir una función principal para el sistema, basándonos en la meta de venta de energías que tiene el ingenio como tal, tomando en cuenta la capacidad de las calderas y el principal negocio de la empresa. Una vez definida la función principal y funciones secundarias, se trató de identificar todos aquellos modos de fallas que hacen que la función principal o secundaria no se cumpla, también aquellos componentes que si tienen un fallo, afectan la función del sistema, durante este paso se tuvieron dificultades, debido que la base de datos de fallos no contenía los datos de manera correcta, se tuvo que realizar una investigación de la misma base de datos, ya que muchas fallas fueron declaradas como mantenimiento preventivo, otros incluso no fueron declarados.

Una vez identificados todos los modos de fallas, con la experiencia de los operadores y la base de datos de los fallos y el coordinador de proceso, se calculó el nivel de criticidad de los modos de fallos, se tomó en cuenta el costo de reparación, el tiempo de parada y las afectaciones a la seguridad y el medio ambiente, criterios más importantes.

Aprovechando el apoyo del proceso, se logró identificar las causas raíces de los modos de fallos, posteriormente se utilizó el diagrama de decisiones propuesto por el autor John Moubrey para definir una estrategia de mantenimiento eficaz para mitigar o eliminar los modos de fallos.

Es importante mencionar nuevamente que el proceso RCM no es un proceso estandarizado, pero que algunas normas como la ISO 14224 o la norma SAEJA111 otorgan una guía para la aplicación, el proceso realizado en este trabajo fue verificado y aprobado por la gerencia de fábrica y el coordinador del proceso de Energía del Ingenio Monte Rosa.

## **Recomendaciones.**

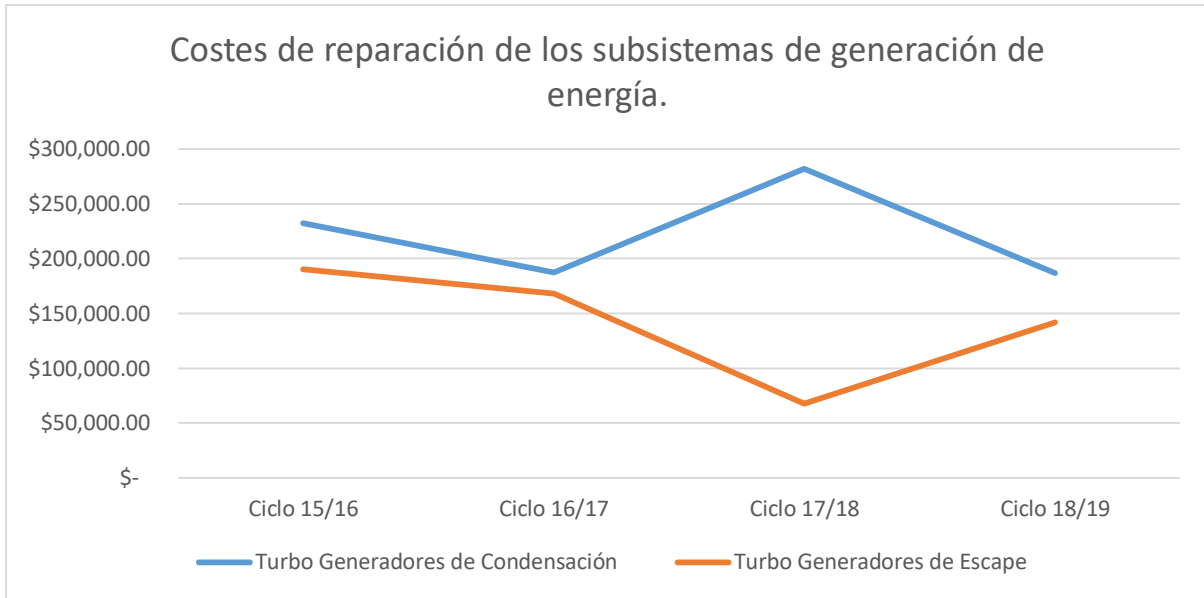
Se encontraron muchos factores que afectan el estado de los equipos, entre ellos, la falta de capacitaciones constantes en los operadores, la falta de métodos de preservación de los equipos e incluso hasta la falta de mantenimiento de equipos, también muchos de los equipos ya han completado el periodo de vida útil y es normal que empiecen a degradarse ante la falta de preservación y la imposibilidad de realizar mantenimiento periódico sistemático.

Por otro lado, también es importante capacitar a la gente sobre el uso y llenado de las ordenes de trabajos o avisos de averías, como se mencionó antes, si estos son mal llenados, afectaran la base de datos.

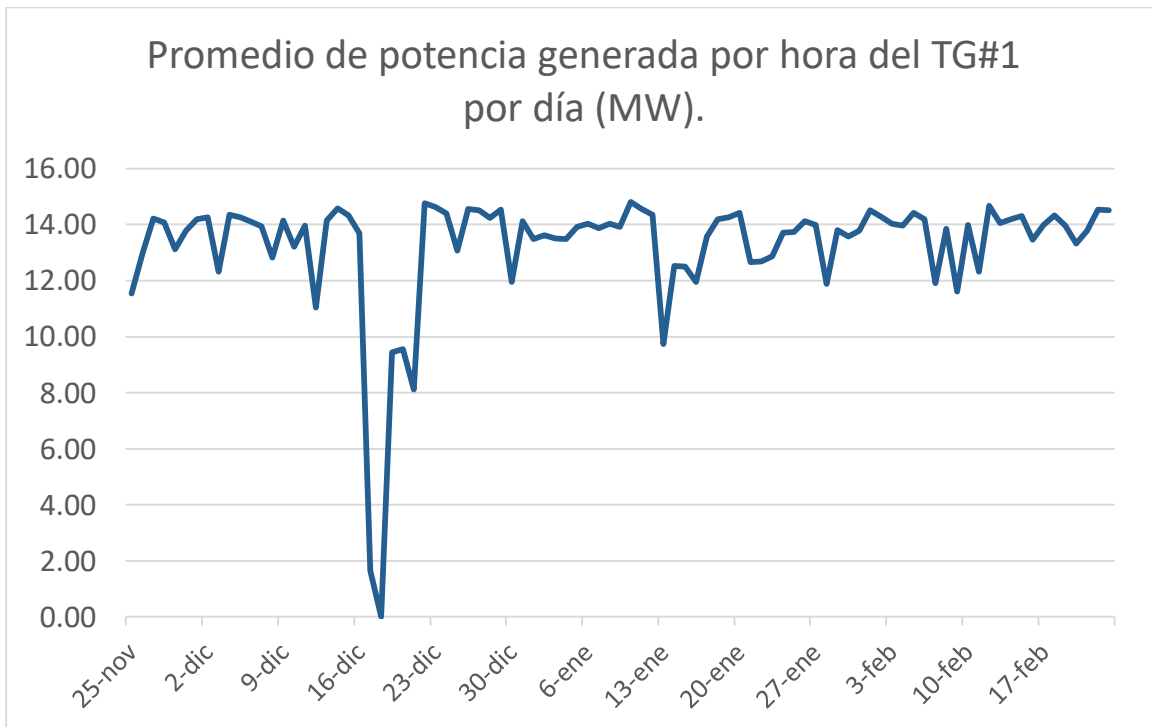
## Bibliografía.

- [1] Ing. John M. (1997), *Mantenimiento centrado en confiabilidad (RCM)*, Biddles Ltd. Gran Bretaña, ISBN: 09539603-2-3,
- [2] Ing. Jiménez A. (2015), *Manual de Gestión de Estratégica de mantenimiento*, Programa de Certificación en Ingeniería de Confiabilidad Operacional, Argentina, PDM Consultores.
- [3] Ing. Jiménez A. (2015), *Confiabilidad y Análisis estadístico de Fallos*, Programa de Certificación en Ingeniería de Confiabilidad Operacional, Argentina, PDM Consultores.
- [4] Jiménez A. (2015), *Métodos de Análisis Causa-Raíz*, Programa de Certificación en Ingeniería de Confiabilidad Operacional, Argentina, PDM Consultores.
- [5] García S. (2010), *Organización y Gestión Integral de Mantenimiento*, Ediciones Díaz Santos, Madrid, ISBN: 978-7978-548-2.
- [6] Parra M., Crespo A, (2012), *Ingeniera de Mantenimiento y fiabilidad Aplicada en la Gestión de Activos*, INGEMAN, España, ISBN: 978-84-95499-67-7.
- [7] The British Standards Institution (2016), Norma Internacional ISO 14224: *Industrias de petróleo y gas natural Recolección e intercambio de datos de confiabilidad y mantenimiento de equipos*, International Organization For Standarization, ISBN 978 0 580 90387 8.

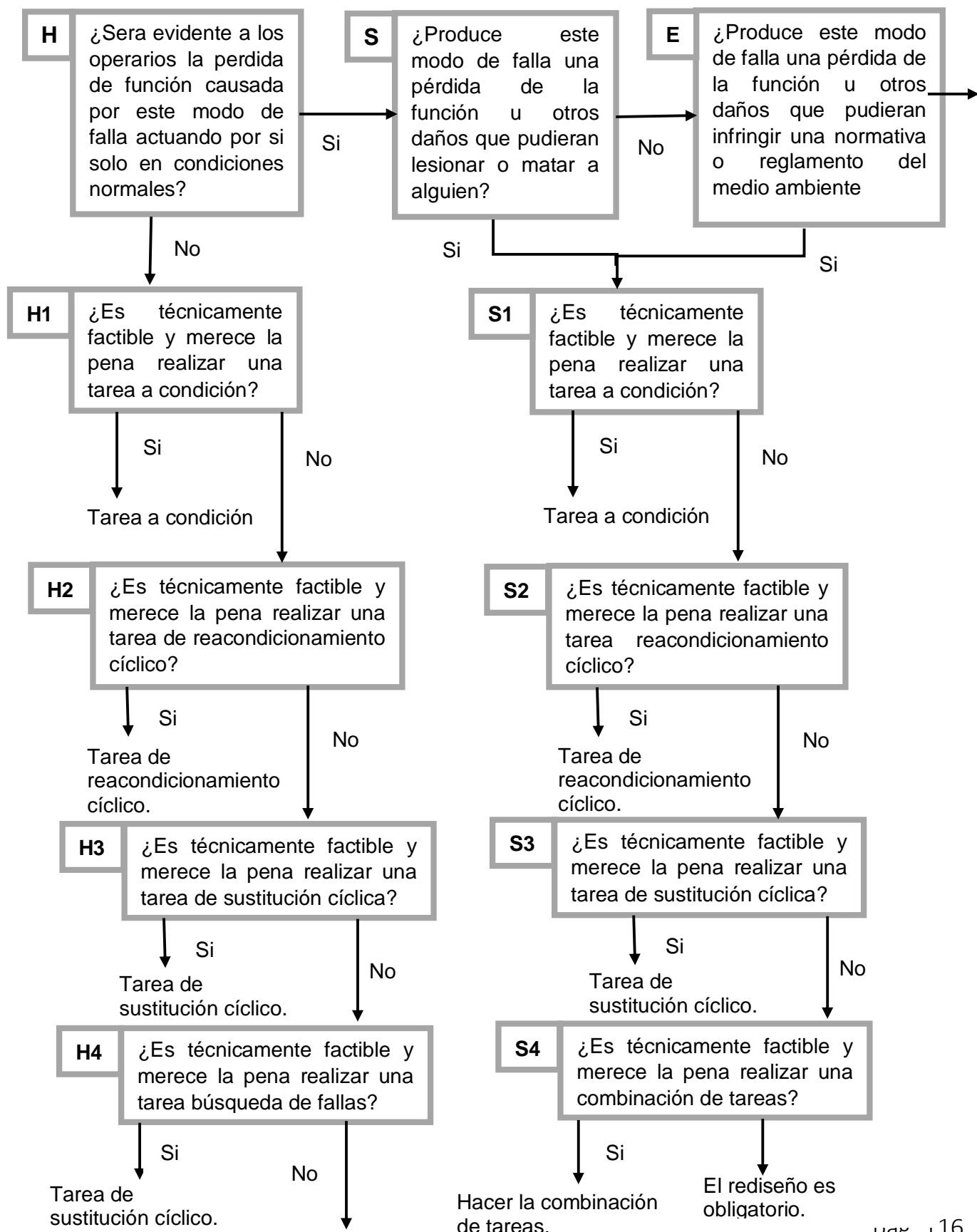
## Anexos:

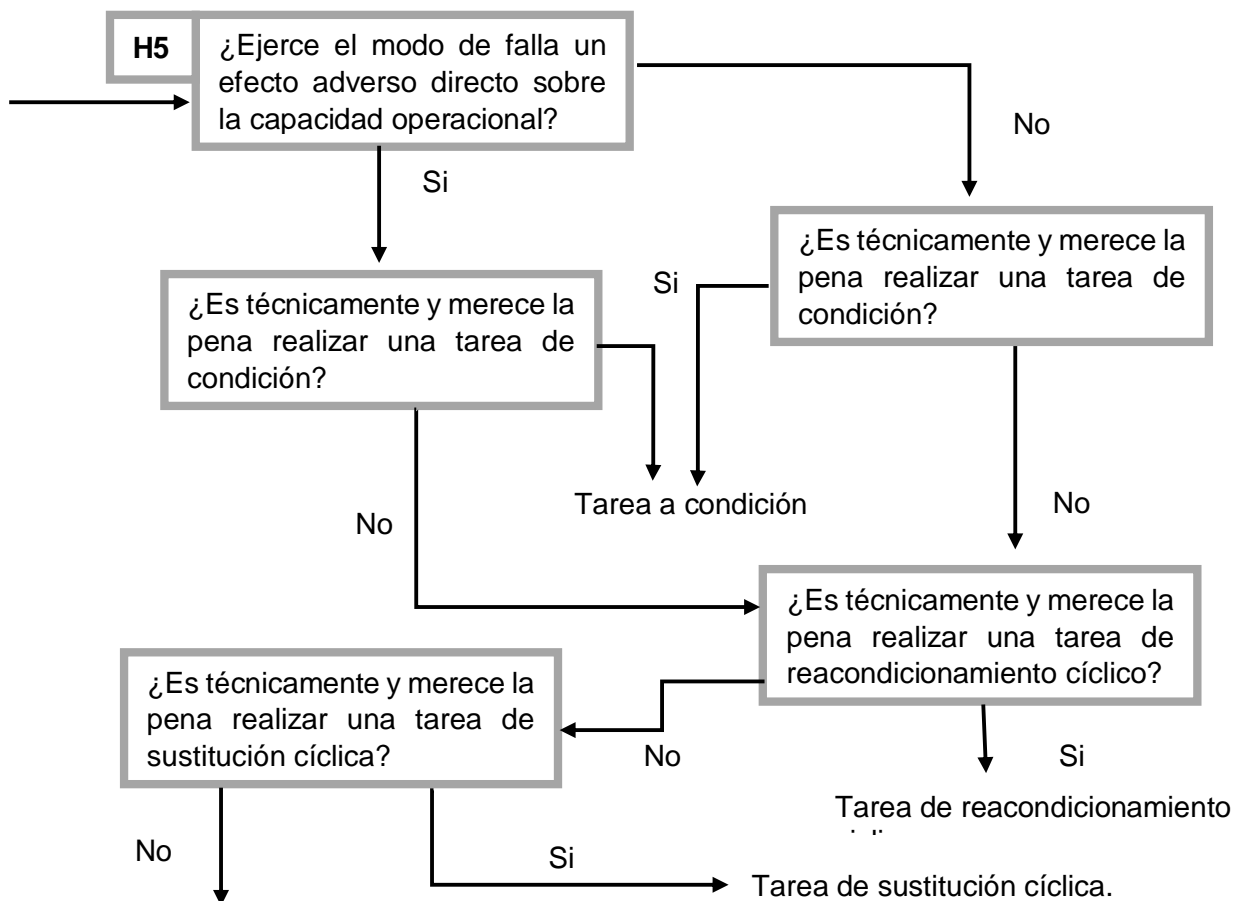
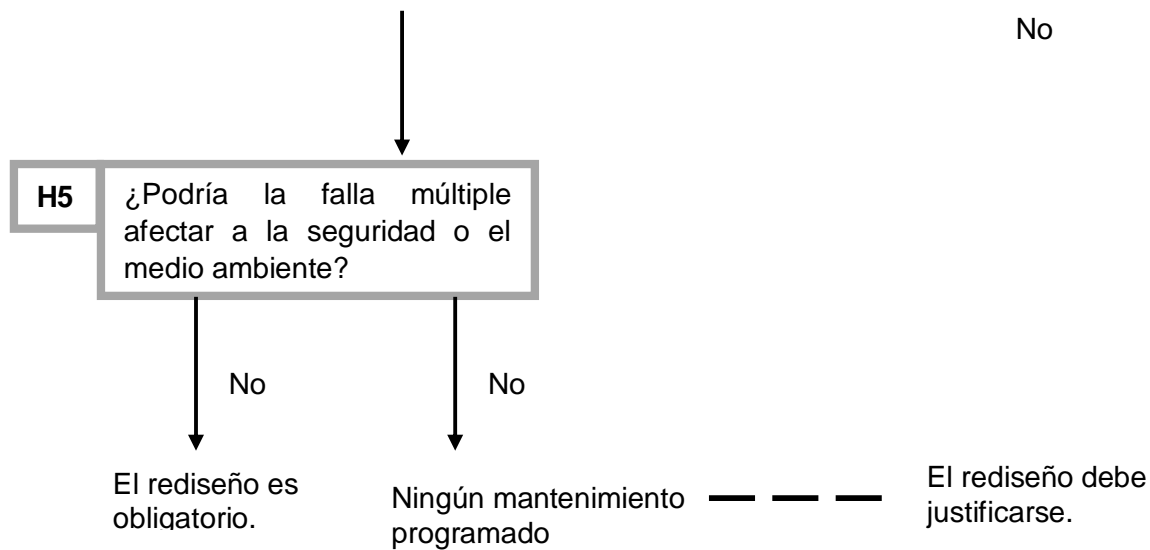


Anexo 1.1 histórico de costos por fallas en sistemas de turbogeneradores de escape y turbogenerador de condensación de los últimos 4 ciclos, proporcionada por Monte Rosa.



Anexo 1.2, Datos de potencia activa promedio durante el día en turbogenerador de condensación, dato usado para plantear la función principal del sistema, suministrado por Monte Rosa





Anexo 1.3, Diagrama de decisiones RCM para selección de tareas, obtenido del libro de Mantenimiento Basado en RCM de John Mubray





Anexo 1.4, Turbogenerador de condensación de 16.4MW en la Planta Eléctrica Monte Rosa.